



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y  
MATEMÁTICAS**



## **TÍTULO DE LA TESIS**

**Diseño e implementación de un prototipo de sistema Scada  
para una planta de nivel, presión y flujo utilizando PLC  
Allen Bradley en el laboratorio de Ingeniería Electrónica de la  
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

Camizán Cunias Kelvin  
García Puelles Michael Deyvi

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2017**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



Diseño e implementación de un prototipo de sistema Scada para una planta de nivel, presión y flujo utilizando plc Allen Bradley en el laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

Camizán Cunias Kelvin  
García Puelles Michael Deyvi

**Asesor:**

Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO FACULTAD DE  
CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**TÍTULO DE LA TESIS**

Diseño e implementación de un prototipo de sistema Scada para una planta de nivel, presión y flujo utilizando plc Allen Bradley en el laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Como requisito para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico.

**Sustentada por:**

Bach. Camizán Cunias Kelvin Tesista

Bach. García Puelles Michael Deyvi Tesista

**Asesorado por:**

Ing. Oscar Ucchelly Romero Cortez

Asesor

**LAMBAYEQUE – PERU'**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO FACULTAD DE  
CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**TÍTULO DE LA TESIS**

Diseño e implementación de un prototipo de sistema Scada para una planta de nivel, presión y flujo utilizando PLC Allen Bradley en el laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Como requisito para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico.

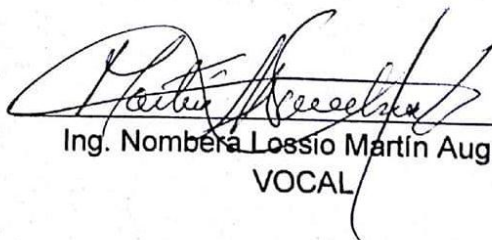
**Aceptada por la escuela profesional de Ingeniería Electrónica.**



Ing. Ramírez Castro Manuel Javier  
PRESIDENTE



Ing. Oblitas Vera Carlos Leonardo  
SECRETARIO



Ing. Nombere Lasso Martin Augusto  
VOCAL

**LAMBAYEQUE – PERU'**

**2017**

**IV**

## **DEDICATORIA**

A dios por tantas bendiciones sobre mi familia, a mi hermano Yan Andy que desde el cielo siempre me cuida.

A mi madre por su amor incondicional, por siempre estar ahí para mí, por ser la razón de mi superación.

A mi padre, mi mejor amigo por su apoyo constante e incondicional por apoyarme en cada paso que doy.

A mi hermana Ali, mi ejemplo a seguir, por inculcar en mí el estudio y la disciplina, por sus consejos por darme siempre ánimos y no dejar rendirme.

A mi código 2011-I, mis grandes amigos, sin ellos esta aventura universitaria no hubiese sido la mejor y más linda experiencia de mi vida.

Camizán Cunias Kelvin  
Bachiller en Ingeniería Electrónica

Lambayeque, 2017.

A Dios, por derramar muchas bendiciones en mí y en mi hermosa familia.

A mis padres Dora y Marto, por todo el amor, comprensión y confianza que me brindan cada día, por su esfuerzo, sacrificio y sobre todo por el apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

A mi hermana Pamela, por su confianza y a toda mi familia son mi motivo de superación en la vida.

García Puelles Michael Deyvi  
Bachiller en Ingeniería Electrónica

Lambayeque, 2017.

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos expresarles nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que en algún momento del desarrollo del proyecto nos brindaron su apoyo.

Al Ing. Víctor Jara Sandoval, quien fue nuestro asesor y nos apoyó desde el planteamiento del proyecto, y estuvo presente en cada paso durante el desarrollo del mismo.

Al Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez, quien nos apoyó siendo nuestro nuevo asesor y estuvo presente en cada paso durante el desarrollo del mismo, dando sus consejos y ayudándonos a sobrellevar cada inconveniente que encontramos en el proceso y gran parte de la realización de las pruebas, brindándonos herramientas, conocimientos y apoyo incondicional.

A nuestros familiares y amigos, por estar siempre en los buenos y malos momentos de esta investigación, porque gracias a ellos se logró culminar satisfactoriamente este proyecto de tesis.

Camizán Cunias Kelvin  
Bachiller en Ingeniería Electrónica

García Puelles Michael Deyvi  
Bachiller en Ingeniería Electrónica

Lambayeque, 2017.

## **Resumen**

Este trabajo de tesis fundamentalmente se enfoca en el desarrollo de un sistema SCADA utilizando FACTORY TALK como software para la adquisición y monitoreo de las variables; siendo NIVEL, PRESIÓN y FLUJO las variables a utilizar en este proyecto.

La planta a controlar constará con un PLC Compact Logix L32E, el cual hará la función de PLC central que a través de mensajería se comunicará con un PLC Micrologix 1400 que tiene la función de adquirir los datos de campo a través de sus módulos de entradas y salidas analógicas o digitales.

La planta está constituida por dos tanques, uno que sirve de almacenamiento de agua y otro para hacer el control de nivel de agua, un variador de frecuencia que controla una electro bomba, un transmisor indicador de flujo, un transmisor de presión y un sensor de nivel hecho con Arduino UNO, una válvula ON/OFF que sirve como desfogue del agua para la simulación de perturbaciones en la planta.

Otro punto importante en el desarrollo de este proyecto de tesis es el control en cascada que se utilizará entre las variables de control: FLUJO (variable principal), PRESIÓN (variable) secundaria, con el fin de tener un control más estable y con respuestas más rápidas ante perturbaciones que se presenten.



## **ABSTRACT**

This thesis work focuses mainly on the development of a SCADA system using FACTORY TALK as software for the acquisition and monitoring of variables; Being LEVEL, PRESSURE and FLOW are the variables to be used in this project.

The plant to be controlled with a Logix Compact PLC L32E, which acts as the central PLC that through messaging communicates with a Micrologix 1400 PLC that has the function of acquiring the field data through its input and output modules Analog or digital.

The plant consists of two tanks, one that serves as water storage and another for water level control, a frequency inverter that controls an electric pump, a flow indicator transmitter, a pressure transmitter and a pressure sensor. Level made with Arduino ONE, an ON / OFF valve that serves as a water outlet for the simulation of disturbances in the plant.

Another important point in the development of this thesis project is the cascade control that are used in the control variables: FLOW (main variable), secondary (variable) PRESSURE, in order to have a more stable control and with more responses Before the presentations.

# ÍNDICE

Dedicatoria	V
Agradecimiento	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Introducción	1
Capítulo I. Problemática en el área de control e instrumentación en el Laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica	2
1.1. Situación Problemática	2
1.2. Justificación del estudio	3
1.3. Objetivos del estudio	3
Capítulo 2. Marco Teórico	5
2.1. Sistemas de control	5
2.2. Modelado matemático de sistemas de control	5
2.3. Función de transferencia	6
2.4. Polos y ceros de la función de transferencia	7
2.5. Estabilidad de un sistema	8
2.6. Definición	9
2.7. Tipos de sistemas de control	11
2.8. Controlador	15
Capítulo 3. Generalidades	69
3.1. Planta de nivel, presión y caudal	69
3.2. Software de Programación	84
CAPÍTULO IV MODELADO DEL SISTEMA Y ADQUISICION DATOS	107
4.1. Adquisición de datos de la planta	107
CAPÍTULO V RESULTADOS	122
5.1. Resultados Experimentales	122
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de un sistema lineal	6
Figura 2.1 Diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto	12
Figura 2.2 Diagrama de bloques de un sistema controlado por el actuador	12
Figura 2.3 Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado	13
Figura 2.4 Diagrama de un sistema en lazo cerrado complejo	14
Figura 3.1 Sistema de control del líquido	16
Figura 4.1. Efecto de la ganancia del controlador sobre la salida del controlador	18
Figura 4.2 Circuito para control de nivel del líquido	19
Figura 4.3 Respuesta del sistema de nivel de líquido	19
Figura 5.1 Respuesta del controlador proporcional integral (PI) (acción directa)	20
Figura 6.1 Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral	21
Figura 7.1 Registro de un Circuito de Flujo	23
Figura 8.1 Métodos en lazo cerrado	24
Figura 8.2 Métodos en lazo abierto	24
Figura 8.3 Método de las oscilaciones sostenidas	25
Figura 9.1 Método de la curva de respuesta	26
Figura 10.1 Controlador PIP Paralelo Relación entre error y señal de control	28
Figura 10.2 Controlador PIP Serie	29
Figura 11.1 Estructura de control en cascada	30
Figura 11.2 Componentes por retroalimentación simple	33
Figura 11.3 Diagrama de bloques del esquema	33
Figura 11.4 Sistema de control en cascada	35
Figura 11.5 Diagrama de bloques del sistema de control en cascada	35
Figura 11.6 Diagrama de bloque y diagrama de tubería e instrumentación	36
Figura 12.1 Estructura corporativa	43
Figura 12.2 Sistema de anillo concéntrico	46
Figura 12.3 Sistema de anillo concéntrico: rotura	46
Figura 13.1 Sistema Scada escalable paso 1	50
Figura 13.2 Sistema Scada escalable paso 2	50
Figura 13.3 Sistema Scada escalable paso 3	51
Figura 13.4 Sistema Scada escalable paso 4	52
Figura 14.1 Estructura básica de un sistema de supervisión y mando	53
Figura 14.2 Idea básica de un sistema Scada	54
Figura 14.3 Estación Maestra o Master	55
Figura 14.4 La estación maestra interroga a las RTU	56
Figura 14.5 Red de Telemetría	57
Figura 14.6 Estación de supervisión	58
Figura 14.7 Sistema de cableado convencional versas bus de campo	60
Figura 15.1 Controladores lógicos programables (PLC)	63
Figura 15.2 Diagrama de bloques de un PLC gobernando un proceso	64
Figura 15.3 Fuente de alimentación PLC Allen Bradley, MicroLogix 1500	65
Figura 15.4 Unidad procesamiento central: Allen Bradley 1769-L32E CompactLogix	66
Figura 15.5 Módulos de entradas y salidas: ALLEN BRADLEY 1769 COMPACT I/O	67
Figura 16.1.1 Planta de nivel, presión flujo.	69

Figura 16.1.4 Tanque rectangular de 40cmx1.2x45cm	71
Figura 16.1.5 Medidas de tuberías	71
Figura 16.1 Transmisor indicador de flujo	73
Figura 16.2 Transmisor de presión	73
Figura 16.3 Transmisor de nivel	73
Figura 16.4 Válvula On-Off	74
Figura 16.5 Bomba centrífuga	74
Figura 16.6 Variador de frecuencia	75
Figura 16.7 Controlador Lógico Programable Central	76
Figura 16.7 Controlador Lógico Programable Secundario	76
Figura 17.1 Ventana principal de RSlinx Classic	77
Figura 17.2 Pasos para establecer la comunicación con el PLC	78
Figura 17.3 Lista desplegable	78
Figura 17.4 Escogiendo el driver ethernet devices	79
Figura 17.5 Haciendo click en Add new	79
Figura 17.6 Colocando la dirección IP del PLC	80
Figura 17.7 Comprobando que se estableció el driver	80
Figura 18.1 Ventana principal de RSlogix 500	81
Figura 18.2 Haciendo click en new	81
Figura 18.3 Eligiendo el driver que se creó con anterioridad en RSlinx	82
Figura 18.4 Carga de los módulos de entradas y salidas	82
Figura 18.5 Instrucción JSR	83
Figura 18.6 Creación de la programación en LADDER	83
Figura 19.1 Ventana principal de software RSlogix 5000	84
Figura 19.2 Creación de un nuevo proyecto	84
Figura 19.3 Elección del controlador del PLC en la lista desplegable	85
Figura 19.4 Guardado en la ruta de preferencia	85
Figura 19.5 Ventana de elección de módulo	86
Figura 19.6 Ventana de módulos de expansión	86
Figura 19.7 Programación de New routine	87
Figura 19.8 Ladder diagram	87
Figura 19.9 Creando rutina en el lenguaje ladder	88
Figura 19.10 En MainRoutine a través de la instrucción JSR	88
Figura 19.11 Creación del programa ladder	89
Figura 19.12 Procedimiento de cargar el driver para descargar al PLC	89
Figura 19.13 Remover el bit forzado	90
Figura 19.14 Apagado del motor	90
Figura 19.15 Saliendo de línea	91
Figura 20.1 Ventana de inicio de FactoryTalk View Studio	92
Figura 20.2 Click en la pestaña new	92
Figura 20.3 Escogiendo la pantalla HM PVPlus 400/600	93
Figura 20.4 Selección de Create new configuration	93
Figura 20.5 Establecer la comunicación del PLC y HMI	94
Figura 20.6 Estableceremos la dirección IP del PLC	94
Figura 20.7 Configuración de la pantalla HM	95

Figura 20.8 En pestaña general cambio de color, forma, entre otros	95
Figura 20.9 En pestaña states nombra botón y cambiar el color entre estados	96
Figura 20.10 En pestaña Connections añadir el Tag al botón	96
Figura 20.11 Llamar a los tag de nuestro programa en ladder a cada botón	97
Figura 20.12 Pantalla con los dos botones con sus tags	97
Figura 20.13 En pantalla principal clic derecho en copy as picture	98
Figura 20.14 Configuración de cada botón	98
Figura 20.15 Click en test application	99
Figura 20.16 Para correr el programa Click en test application	99
Figura 21.1 subrutina para el escalamiento del transmisor de flujo	101
Figura 21.2 subrutina para el escalamiento del transmisor de presión	101
Figura 21.3 Subrutina para el escalamiento del transmisor de nivel	101
Figura 21.4 subrutina para el escalamiento del variador	102
Figura 21.5 Esta rutina llamará a las subrutinas con los Datos adquiridos	102
Figura 21.6 Transmisión de Datos utilizando protocolo CIP al PLC CompactLogix L32E	102
Figura 22.1 PANTALLA DE INICIO. Programación en factorytalk view	103
Figura 22.2 PANTALLA DE PROCESO. Programación en factorytalk view	103
Figura 23.1 El tag HMI_START se adquiere del PLC L32E	104
Figura 23.2 El tag HMI_STOP se adquiere del PLC L32E	104
Figura 23.3 El tag PT (transmisor de presión) se adquiere de PLC L32E	104
Figura 23.4 El tag FIT (transmisor indicador de flujo) se adquiere de PLC L32E	105
Figura 23.5 El tag LT (transmisor de nivel) de adquiere de PLC L32E	105
Figura 23.6 El tag SP (Set point) de adquiere de PLC L32E	105
Figura 23.7 El tag DATA_VIT (VARIADOR DE FRECUENCIA) se adquiere de PLC L32E	106
Figura 24.1 En la ilustración se muestra el bloque PIDE	106
Figura 24.2 Creación del bloque RUN_PIDE_01	107
Figura 24.3 Programación en lenguaje ladder del bloque RUN_PIDE_01	107
Figura 24.4 Rutina principal, utilizada para llamar a las demás subrutinas	107
Figura 24.5 Rutina de escalamiento	108
Figura 24.6 Rutina de mensajería	108
Figura 25.1 Configuración de la ecuación PID	109
Figura 25.2 Configuración de los parámetros de la instrucción PID	110
Figura 25.3 Etiqueta del auto-sintonizador	111
Figura 25.4 Cuadro de diálogo del Autotune PIDE	112
Figura 25.5 Cuadro de resultados de la auto-sintonización	113
Figura 26.1 Parámetros que se configuran para el autotuneo del bloque PIDE	115
Figura 26.2 Resultados del autotuneo en las 3 respuestas: lenta, media y rápida	116
Figura 27.1 Conexión en cascada entre los bloques PIDE de PRESION Y FLUJO	117
Figura 28.1 parámetros obtenidos mediante el autotuneo	118
Figura 29.1 Gráfica en tiempo real de PRESIÓN Y FLUJO con un SP establecido	118
Figura 30.1 Conexión en cascada entre los bloques PIDE de PRESION Y NIVE	119
Figura 30.2 parámetros obtenidos mediante el autotuneo	120

Figura 30.3 gráfica en tiempo real de PRESIÓN Y NIVEL con un SP establecido	121
Figura 31.1 Conexión en cascada entre los bloques PIDE de NIVEL Y FLUJO	121
Figura 31.2 Parámetros obtenidos mediante el autotuneo: respuesta media	122
Figura 31.3 Gráfica en tiempo real variables NIVEL Y FLUJO con un SP establecido	122

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Ganancia del controlador $k_{cu}$	25
Tabla 1.2 Valores recomendados de sintonización	26
Tabla 1.3 Ajuste del controlador	27
Tabla 1.4 Parámetros según método en lazo abierto	27
Tabla 2.1 Direcciones físicas del PLC utilizadas	97
Tabla 2.2 Posiciones de los módulos instalados	107

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo de investigación comprende de un tema de mucha importancia en la actualidad del campo industrial y producción, se trata del control, automatización y supervisión de procesos.

Hoy en la actualidad con el avance de la tecnología la Ingeniería se ha visto en la necesidad de ayudarse de la existencia de nuevos dispositivos de control como son PLC, variadores de frecuencia, transmisores, sensores, actuadores neumáticos, electro neumáticos etc. utilizados para la automatización de procesos industriales de tal forma que su secuencia productiva sea más eficiente.

El tema de automatización nos muestra claramente un aporte fundamental en las empresas de producción, ya que permite reducir de manera amplia el trabajo humano y ahorrar tiempo; con todo ello se aumenta la productividad e ingresos económicos. La parte de control nos permite verificar y hacer que la planta una vez automatizada según la función que se le asigne y mediante la supervisión podemos verificar en tiempo real todo el proceso desde cualquier lugar, obteniendo datos (cantidad, tiempo, alertas, fallas, etc.) sobre el funcionamiento de la planta con el objetivo de tomar decisiones y ejecutarlas.

La mayoría de las industrias al implementar nuevos proyectos toman en cuenta como principal factor la economía; para lo cual se estudia la forma de economizar más, esto nos ha llevado a la investigación completa para un sistema Scada para una planta de nivel, presión y flujo utilizando PLC Allen Bradley en el Laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

# Capítulo 1

## **Problemática en el área de control e instrumentación en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la UNPRG**

### **1.1. Situación Problemática**

En la actualidad las industrias consideran la automatización de procesos fundamental para garantizar la calidad del producto y eficiencia del proceso, como, por ejemplo, controlar nivel y temperatura de diferentes tipos de líquidos, gases vapores etc., lo cual es común en la industria. Los sistemas de control ofrecen un nivel de seguridad durante el desarrollo y obtención del producto final permitiendo garantizar la ejecución de procesos en la industrial tales como manufactureras, alimenticias, comerciales entre otras. (Arias y Piracoca, 2015).

La automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano. En los últimos años, se ha estado desarrollado el sistema denominado SCADA (siglas en inglés de Supervisory Control And Data Acquisition), por medio del cual se pueden supervisar y controlar las distintas variables que se presentan en un proceso o planta. Para ello se deben utilizar diversos periféricos, software de aplicación, unidades remotas, sistemas de comunicación, etc., que le permiten al operador tener acceso completo al proceso mediante su visualización en una pantalla de computador. (Pérez, 2014)

En la actualidad el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica dispone de distintos módulos y equipos para el buen desarrollo de los estudiantes en lo que al área de control e instrumentación se refiere.

Actualmente el laboratorio cuenta con dos plantas una de Nivel y otra de Presión en las cuales se trabaja dichas variables por separado, la planta de nivel la cual trabaja con un PLC SIEMENS S7-200 y la planta de presión que trabaja con un PLC MODICON M340.

Además, cabe recalcar que la técnica de control que se utilizará para diseñar esta planta es el control en cascada ya que en esta planta interviene más de una variable;



obteniendo así un sistema más estable ante posibles perturbaciones a diferencia de las plantas en las que solo interviene una sola variable.

“El control en cascada se define como la configuración donde la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación. Más exactamente, el control de cascada involucra sistemas de control de realimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro”. (Zambrano, 2013)

Por lo descrito anteriormente resulta la idea de diseñar e implementar un sistema SCADA utilizando FactoryTalk en una planta en la que intervengan tres variables (nivel, presión y flujo) utilizando un PLC CompactLogix L32E de ALLEN BRADLEY para el control y monitoreo de las variables antes mencionadas utilizando un control en cascada.

## **1.2. Justificación del trabajo de tesis**

Esta investigación se desarrollará con la finalidad de implementar un sistema SCADA en la plataforma de FACTORY TALK VIEW, el cual nos permitirá controlar nuestro proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador. Así también mediante la configuración de una red EtherNet/IP conformada por un PLC COMPACT LOGIX L32E, PANEL VIEW 600 Y UNA PC lograremos una comunicación por demás sencilla y práctica, pero sobre todo confiable por lo estandarizado que es este tipo de redes en la industria.

Además implementar una planta en la cual intervengan tres variables juntas (Nivel, Presión y Flujo) y no variables separadas como se estaba acostumbrado hacer resulta muy interesante como fines didácticos además el hecho de tener una planta donde intervienen tres variables conlleva a aplicar una técnica de control que no es muy utilizada en el Laboratorio De Ingeniería Electrónica; hablamos del Control En Cascada, la cual es muy diferente al control por realimentación que es la que se usa normalmente en una planta con una sola variable.

## **1.3. Objetivos del Trabajo de Tesis**

Los objetivos logrados se enmarcan dentro de un objetivo principal y varios Secundarios, los cuales se detallan a continuación.

### **1.3.1. Objetivo Principal**

Implementar un sistema SCADA para el control y monitoreo de una planta de NIVEL, PRESIÓN Y FLUJO utilizando software FACTORY TALK VIEW.

### **1.3.2. Objetivos Secundarios**

Los objetivos secundarios planteados son:

1. diseñar un control en cascada con tres variables: variable principal (nivel), variable (presión y flujo)
2. Evaluar el comportamiento de un control en CASCADA, estabilidad y velocidad de respuesta ante perturbaciones.
- 3.- Diseñar configurar una red Ethernet/IP para la comunicación entre nuestros equipos: PLC ALLEN BRADLEY L32E, PANEL VIEW 600 Y PC.
4. Familiarizar a los estudiantes de la EPIE con los equipos y software Allen Bradley de Rockwell Automation.
5. Utilizar software Factory talk view para crear un Sistema SCADA empleando una comunicación OPC.

## **Capítulo 2 Marco Teórico**

### **2.1. Sistemas de control**

#### **2.1.1. Sistema**

Un sistema es un conjunto de componentes relacionados entre sí, que como característica principal tienen que a través de una entrada aplicada sobre dicho sistema generamos una salida, un sistema puede ser físico, matemático económico, etc.

Según Chiavenato (2000), un sistema puede definirse como "un conjunto de elementos dinámicamente relacionados, en interacción que desarrollan una actividad para lograr un objetivo o propósito operando como datos-energía-materia unidos al ambiente que rodea el sistema para suministrar información-energía".

#### **2.1.2. Sistema de control**

Un sistema de control es una interconexión entre componentes formando un sistema de configuración que provee una respuesta deseada, en otras palabras, un sistema de control es un tipo de sistema que a partir de una entrada prefijada que pasará y será modificada por una serie de componentes (sistema) se obtendrá una salida deseada. (Dorf, 2005)

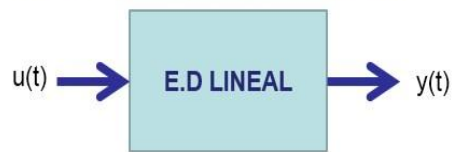
Según Kuo (1996). Estos sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria, tales como control de calidad de los productos manufacturados, líneas de ensamble automático, control de máquinas-herramienta, control por computadora, robótica y muchos otros.

### **2.2. Modelado matemático de sistemas de control**

El modelo matemático es una expresión que permite representar el comportamiento de un proceso físico en función de las variables que intervienen en dicho proceso. (Leal, 2014)

La aplicación de las leyes que rigen los procesos generan modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales, es aplicable a sistemas mecánicos, eléctricos, de fluidos, termodinámicos, etc.

#### MODELO DE UN SISTEMA LINEAL:



$u(t) \rightarrow$  variable de Estimulo o Entrada

$y(t) \rightarrow$  variable de Respuesta o Salida

$t \rightarrow$  variable independiente tiempo

Figura 1.1 Modelo de un sistema lineal

### 2.3. Función de transferencia

La función de transferencia es un modelo matemático que relaciona la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo condiciones iniciales a cero. (Ogata, 2003)

Por definición una función de transferencia se puede determinar según la expresión.

$$\mathbf{G(s)} = \frac{\mathbf{Y(s)}}{\mathbf{U(s)}}$$

$U(s)$  es el estímulo de valor conocido e  $Y(s)$  es la respuesta del sistema en el dominio  $s$ , por lo que aplicando la transformada inversa de Laplace  $L^{-1}$  se puede obtener la respuesta real del sistema en el tiempo.

$L^{-1} \{Y(s)\} = L^{-1} \{U(s) G(s)\} = y(t)$  Respuesta real del sistema en el dominio real del tiempo.

Para encontrar  $G(s)$ , se aplican:

- Funciones típicas de estímulo (Función escalón).
- Transformadas de Laplace de Funciones Básicas.
- Propiedades de las transformadas de Laplace.

Según las leyes físicas que apliquen los procesos pueden ser:

- Sistemas eléctricos: resistencias, inductancias, capacitancias, ley de ohm, ley de Kirchhoff.

- Sistemas de nivel: tanques válvulas, ley de balance de masas.
- Sistemas mecánicos: masas, resortes, amortiguadores, leyes de newton.

Otros sistemas: Gracias a la función de transferencia se puede conocer:

- Como va a comportarse el Sistema.
- La estabilidad del sistema.
- Los valores que podrán aplicarse a los parámetros del sistema con el fin de hacer el sistema estable.
- térmicos, químicos, velocidad, reactores, entre otros.

## 2.4. Polos y ceros de la función de transferencia

Considerando un sistema descrito por la Ecuación dada tomando la transformada de Laplace y resolviendo para la razón de salida  $Y(s)$  a la entrada  $X(s)$ , la función de transferencia del sistema  $G(s)$  será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{a_n s^n + a_{(n-1)} s^{n-1} + \dots + a_0}{b_m s^m + b_{(m-1)} s^{m-1} + \dots + b_0}$$

El denominador es un polinomio en  $s$  que es igual que en la ecuación característica del sistema. Recordando que la ecuación característica es obtenida a partir de la EDO homogénea, y haciendo el lado derecho de la ecuación igual a cero.

Las raíces del denominador son denominadas los Polos de la función de transferencia. Las raíces del numerador son denominadas los ceros de la función de transferencia (estos valores de  $s$  hacen a la función de transferencia igual a cero).

Factorizando numerador y denominador se tiene:

$$G(s) = \left( \frac{a_n}{b_m} \right) \frac{(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_n)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_m)}$$

donde  $z_i$  = ceros de la función de transferencia

$p_i$  = polos de la función de transferencia

Las raíces de la ecuación característica, las cuales son los polos de la función de transferencia, deben ser reales o deben ocurrir como pares de complejos conjugados. En adición, las partes reales de todos los polos deben ser negativas para que el sistema sea estable.

“Un sistema es estable si todos sus polos se ubican en el lado izquierdo del plano” (Bolton, 2001)

La ubicación de los ceros de la función de transferencia no tiene ningún efecto sobre la estabilidad del sistema. Ellos ciertamente afectan la respuesta dinámica, pero no afectan la estabilidad

#### Ceros

1. El valor(es) para  $z$  donde el numerador de la función de transferencia es igual a cero
2. Las frecuencias complejas que hacen que la ganancia de la función de transferencia del filtro sea cero.

#### Polos

1. El valor(es) para  $z$  donde el denominador de la función de transferencia es igual a cero
2. Las frecuencias complejas que hacen de la ganancia de la función de transferencia del filtro se infinita.

### **2.5. Estabilidad de un sistema.**

Un requerimiento importante para un sistema de control es que debe ser estable. Esto significa que, si al sistema se aplica una entrada de magnitud finita, entonces la salida debería también ser finita y de ningún modo infinita, es decir, incrementarse dentro de un límite. Se tratan las condiciones que se deben satisfacer para sistemas estables. Para sistemas lineales el requerimiento de estabilidad se puede definir en términos de los polos de la función de transferencia en lazo cerrado. Los polos son las raíces del polinomio del denominador de la función de transferencia y los ceros las raíces del polinomio del numerador de la función de transferencia. (Bolton, 2001)

## 2.6. Definición

Para que un sistema de control sea útil, lo primero que debe cumplir es que sea estable. Si el sistema es estable no existe régimen permanente, aunque numéricamente se puedan encontrar los valores de los límites en el dominio de Laplace. Por lo tanto, asegurar la estabilidad del sistema debe ser un paso previo al cálculo numérico de los errores en régimen permanente. (Pérez, 2009)

De manera alternativa, un sistema se puede definir como estable si al estar sujeto a una entrada impulso la salida tiende a cero a medida que el tiempo tiende a infinito. Si, al responder a la entrada impulso, la salida del sistema tiende a infinito a medida que el tiempo tiende a infinito, entonces el sistema es inestable. Sin embargo, si la salida no tiende a cero o no crece a infinito, pero tiende a un valor finito diferente de cero, se dice entonces que el sistema es crítica o marginalmente estable. (Bolton, 2001)

Se puede decir que está es la característica más importante de los sistemas de control ya que, en un sistema estable, la señal de salida al tener un cambio de cualquier tipo en la entrada, no sale de los límites establecidos, por el contrario, se mantiene en una posición sino igual, por lo menos paralela a la señal de entrada.

Según Castillo (2008), existen tres métodos para el cálculo de la estabilidad, ellos son:

- Cálculo de las raíces de la ecuación característica (polos)
- Criterio Routh-Hurwitz
- Criterio de Nyquist

### 2.6.1 El criterio de estabilidad de Routh - Hurwitz.

Conocer las raíces de la ecuación característica, para comprobar si las partes reales de todas ellas son negativas y asegurar así que el sistema es estable, es difícil cuando el orden del sistema es superior a dos. El problema se incrementa si, además, los coeficientes de la ecuación no son valores numéricos, sino que dependen de algún parámetro variable. (Pérez, 2009)

El criterio de Routh-Hurwitz aplicado a la ecuación característica de un sistema permite conocer si es estable o no, sin necesidad de calcular las raíces de dicha ecuación característica.

Sea la función de transferencia.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{p(n)}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

Su ecuación característica posee coeficientes reales.

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

Primero se comprueba que todos los coeficientes  $a_i$  sean positivos. Si hubiese algún coeficiente nulo o negativo, el sistema no sería estable. Si se cumple la condición anterior, que se conoce como condición de Cardano-Viète, el sistema puede ser estable o no. Para comprobar si es estable, se disponen los coeficientes  $a_i$  de forma que sigan el patrón impuesto como se detalla a continuación:

$$\begin{array}{c|cccc} s^n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} & \dots \\ s^{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & \dots \\ s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & \dots & \\ s^{n-3} & c_1 & c_2 & \dots & & \\ \dots & \dots & \dots & & & \\ s^0 & d & & & & \end{array}$$

Donde los coeficientes  $a_i$  se distribuyen en las dos primeras columnas. Los coeficientes de las filas sucesivas se calculan empleando los coeficientes de las dos columnas inmediatamente superiores. Así los coeficientes  $b_i$  se calculan como sigue:

$$b_1 = \frac{a_{n-1} a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}$$

$$b_2 = \frac{a_{n-1} a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}$$

$$b_3 = \frac{a_{n-1} a_{n-6} - a_n a_{n-7}}{a_{n-1}}$$

Análogamente, los coeficientes  $c_i$  se calculan:



$$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-3} b_3}{b_1}$$

A partir de un momento, los coeficientes de las filas valen sucesivamente cero. Estos ceros a veces son necesarios para calcular coeficientes posteriores. Se puede observar que el cálculo de los coeficientes sigue un patrón que se puede memorizar. El denominador siempre es el primer coeficiente de la fila inmediatamente superior. El numerador depende de los coeficientes de las dos filas inmediatamente superiores y es la diferencia de dos productos cuyos términos poseen una posición cruzada. Para sucesivos coeficientes, los dos primeros términos siempre se emplean en el producto cruzado, mientras que los otros dos van avanzando.

El proceso acaba cuando se calcula la fila de coeficientes en  $s_0$ , que sólo posee un coeficiente no nulo,  $d$ . El criterio afirma que el sistema es estable si y sólo si todos los coeficientes de la primera columna de Routh-Hurwitz son positivos. Es, por tanto, una condición necesaria y suficiente. La primera columna la forman los primeros coeficientes de todas las filas. Aunque el criterio sólo se fije en los primeros coeficientes, las filas hay que completarlas enteras, porque todos los coeficientes son necesarios para calcular los inferiores.

Cuando no se cumple el criterio de Routh-Hurwitz, es posible conocer el número de polos del sistema que están en el semiplano de parte real positiva. Existen tantos polos con parte real positiva como cambios de signo aparecen a lo largo de la primera columna de Routh-Hurwitz.

Es importante recalcar que criterio de Routh-Hurwitz informa sobre la estabilidad absoluta, es decir, se limita a mostrar si el sistema es estable o no, sin indicar el grado de estabilidad o inestabilidad, lo próximo o lo alejado que se está de volverse inestable o estable. (Bolton, 2001)

## 2.7. Tipos de Sistemas de Control

Los sistemas de control se pueden clasificar en:

### 2.7.1. Sistemas de control en lazo abierto:

Según Fidalgo, Fernández y Fernández (2016), “Un sistema de control en lazo o bucle abierto es aquél en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. La exactitud de estos sistemas depende de su calibración, de manera que al calibrar se establece una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada”. El diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto es:



Figura 2.1 Diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto.

El sistema se controla bien directamente, o bien mediante un transductor y un actuador. El esquema típico del sistema será, en este caso:

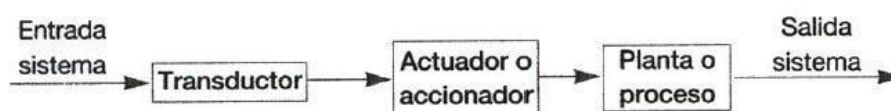


Figura 2.2 Diagrama de bloques de un sistema controlado por el actuador.

El transductor modifica o adapta la naturaleza de la señal de entrada al sistema de control. El actuador o accionador modifica la entrada del sistema entregada por el transductor (normalmente amplifica la señal). Los sistemas de lazo abierto dependen de la variable tiempo y la salida no depende de la entrada.

El principal inconveniente que presentan los sistemas de lazo abierto es que son extremadamente sensibles a las perturbaciones. Por ejemplo, si en una habitación se ha conseguido una temperatura idónea y se abre una puerta o ventana (perturbación) entraría aire frío, de manera que el tiempo necesario para obtener dicha temperatura sería diferente. Si en un sistema en lazo abierto existen perturbaciones, no se obtiene siempre la variable de salida deseada. Conviene, por tanto, utilizar un sistema en el que haya una relación entre la salida y la entrada.

## 2.7.2. Sistemas de control en lazo cerrado:

Un sistema de control de lazo cerrado es aquél en el que la acción de control es, en cierto modo, dependiente de la salida. La señal de salida influye en la entrada. Para esto es necesario que la entrada sea modificada en cada instante en función de la salida. Esto se consigue por medio de lo que llamamos realimentación o retroalimentación (feedback).

La realimentación es la propiedad de un sistema en lazo cerrado por la cual la salida (o cualquier otra variable del sistema que esté controlada) se compara con la entrada del sistema (o una de sus entradas), de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas. A veces también se le llama a la realimentación transductor de la señal de salida, ya que mide en cada instante el valor de la señal de salida y proporciona un valor proporcional a dicha señal. Por lo tanto, podemos definir también los sistemas de control en lazo cerrado como aquellos sistemas en los que existe una realimentación de la señal de salida, de manera que ésta ejerce un efecto sobre la acción de control.

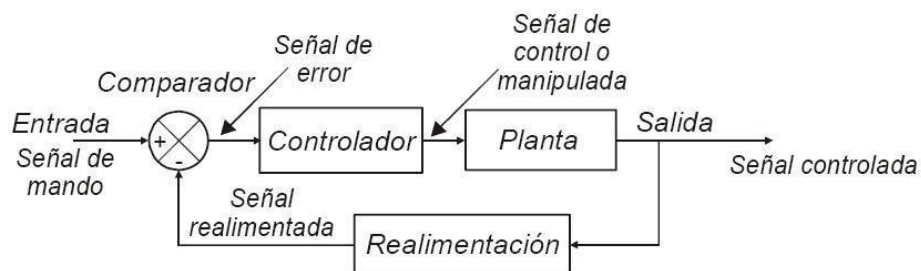


Figura 2.3 Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado.

El controlador está formado por todos los elementos de control y a la planta también se le llama proceso. En este esquema se observa cómo la salida es realimentada hacia la entrada. Ambas se comparan, y la diferencia que existe entre la entrada, que es la señal de referencia o consigna (señal de mando), y el valor de la salida (señal realimentada) se conoce como error o señal de error. La señal que entrega el controlador se llama señal de control o manipulada y la entregada por la salida, señal controlada.

El error, o diferencia entre los valores de la entrada y de la salida, actúa sobre los elementos de control en el sentido de reducirse a cero y llevar la salida a su valor

correcto. Se intenta que el sistema siga siempre a la señal de consigna. El diagrama de bloques anterior se puede sustituir por el siguiente:

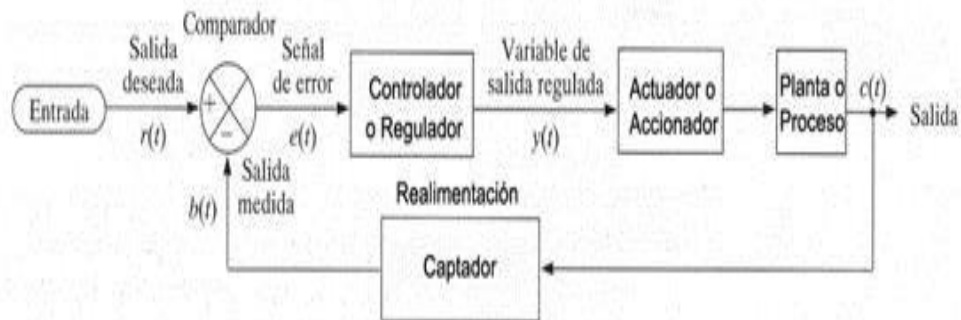


Figura 2.4 Diagrama de un sistema en lazo cerrado complejo.

La salida del sistema de regulación se realimenta mediante un captador. En el comparador o detector de error, la señal de referencia (salida del transductor) se compara con la señal de salida medida por el captador, con lo que se genera la siguiente señal de error:

$$e(t) = r(t) - b(t)$$

Donde:

$e(t)$  es la señal de error  $r(t)$

la señal de referencia  $b(t)$  la

variable realimentada

Pueden suceder dos casos:

1. Que la señal de error sea nula. En este caso la salida tendrá exactamente el valor previsto.
2. Que la señal de error no sea nula. Esta señal de error actúa sobre el elemento regulador que a su salida proporciona una señal que, a través del elemento accionado, influye en la planta o proceso para que la salida alcance el valor previsto y de esta manera el valor se anule.

### **2.7.2.1 Descripción de los principales elementos de un sistema de control en lazo cerrado:**

**Transductor:** Dispositivo (sensor) utilizado para acondicionar la señal de mando (Entrada), para convertirla en una señal de referencia válida.

**Regulador:** El regulador o controlador es el elemento que determina el comportamiento del bucle, por lo que debe ser un componente diseñado con gran precisión. Es el cerebro del bucle de control.

Es el elemento más importante de un sistema de control. Condiciona la acción del elemento “actuador”, en función del error obtenido. Su acción de control puede ser: proporcional (p), derivativa (d), integral (i), ó una combinación de éstas (PD, PI, PDI).

**Actuador:** Elemento final del sistema de control. Actúa directamente sobre el proceso ó sobre la salida.

**Comparador (o detector de error):** Elemento que compara la señal de referencia proveniente del selector de referencia, con la señal realimentada de la salida

**Captador:** Dispositivo (sensor) utilizado en el bloque de realimentación. Acondiciona la señal de salida para introducirla en el comparador

## **2.8. Controlador**

Los controladores son los instrumentos diseñados para detectar y corregir los errores producidos al comparar y computar el valor de referencia o “set point”, con el valor medido del parámetro más importante a controlar en un proceso. Se puede esquematizar como un manual de instrucciones que le indica cómo debe controlar y comunicarse con un dispositivo en particular. Este manipula la entrada al sistema para obtener el efecto deseado en la salida del sistema (retroalimentación).

### **2.8.1. Tipos de controladores**

#### **Clasificación de los controladores.**

Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

1. De dos posiciones o de encendido y apagado (on/of)
2. Proporcionales

3. Integrales
4. Proporcionales-integrales
5. Proporcionales-derivativos
6. Proporcionales-integrales-derivativos

Casi todos los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado, tal como el aceite o el aire. Los controladores también pueden clasificarse, de acuerdo con el tipo de energía que utilizan en su operación, como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

#### **Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off).**

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Es común que los controladores de dos posiciones sean dispositivos eléctricos, en cuyo caso se usa extensamente una válvula eléctrica operada por solenoides. Los controladores neumáticos proporcionales con ganancias muy altas funcionan como controladores de dos posiciones y, en ocasiones, se denominan controladores neumáticos de dos posiciones. En la figura 3.1 se muestra un sistema de control del líquido que es controlado por una acción de control de dos posiciones.

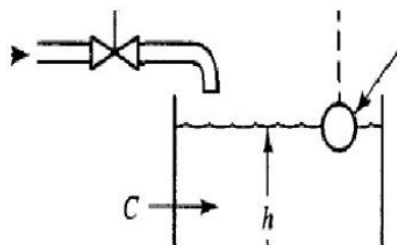


Figura 3.1 Sistema de control del líquido

#### **Control proporcional.**

**Acción de control proporcional.** Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.1}$$

O bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace

$$U(s) = K_p E(s) \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.2}$$

En donde  $K_p$  se considera la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable. El controlador proporcional es el tipo más simple de controlador, con excepción del controlador de dos estados (del cual se hace mención en la primera parte del texto) la ecuación con que se describe su funcionamiento es la siguiente:

$$m(t) = m + K_c r(t) - c(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.3}$$

O

$$m(t) = m + K_c e(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

$m(t)$  = salida del controlador, psig o mA  $r(t)$  = punto de control, psig o mA  $c(t)$  =

variable que se controla, psig o mA; ésta es la señal que llega del transmisor.

$e(t)$  = señal de error, psi o mA; ésta es la diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

$K_c$  = ganancia del controlador, psi/psi ó mA/mA

$m$  = valor base, psig o mA. El significado de este valor es la salida del controlador cuando el error es cero; generalmente se fija durante la calibración del controlador, en el medio de la escala, 9 psig o 12 mA.

Es interesante notar que la ecuación (2.3) es para un controlador de acción inversa; si la variable que se controla,  $c(t)$ , se incrementa en un valor superior al punto de

control,  $r(t)$ , el error se vuelve negativo y, como se ve en la ecuación, la salida del controlador,  $m(t)$ , decrece. La manera común con que se designa matemáticamente un controlador de acción directa es haciendo negativa la ganancia del controlador,  $K_c$ ; sin embargo, se debe recordar que en los controladores industriales no hay ganancias negativas, sino únicamente positivas, lo cual se resuelve con el selector inverso/directo. El  $K_c$  negativo se utiliza cuando se hace el análisis matemático de un sistema de control en el que se requiere un controlador de acción directa. En las ecuaciones (2.3) y (2.4) se ve que la salida del controlador es proporcional al error entre el punto de control y la variable que se controla; la proporcionalidad la da la ganancia del controlador,  $K$ ; con esta ganancia o sensibilidad del controlador se determina cuánto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error. Esto se ilustra gráficamente en la figura. 4.1

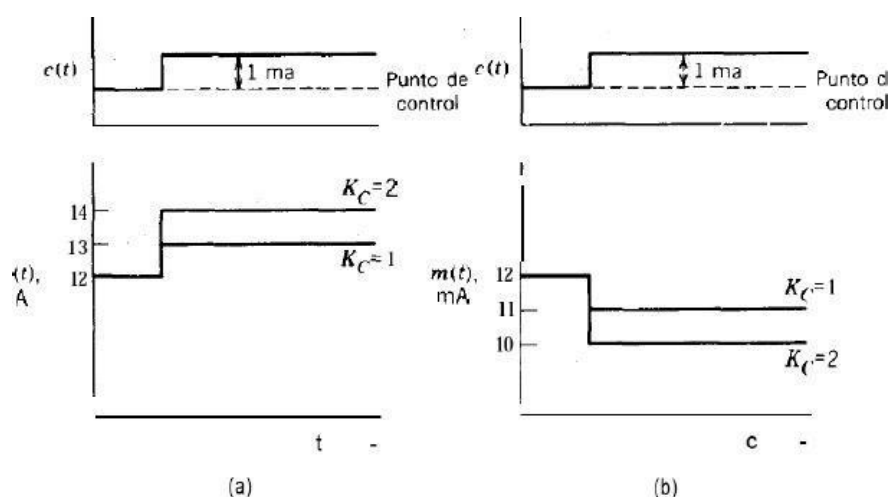


Figura 4.1. Efecto de la ganancia del controlador sobre la salida del controlador.

(a) Controlador de acción directa. (b) Controlador de acción inversa.

Según López (2012), los controladores que son únicamente proporcionales tienen la ventaja de que solo cuentan con un parámetro de ajuste,  $K_c$  sin embargo, adolecen de una gran desventaja, operan con una DESVIACIÓN, o “error de estado estacionario” en la variable que se controla. A fin de apreciar dicha desviación gráficamente, considérese el circuito de control de nivel que se muestra en la figura 4.2; supóngase que las condiciones de operación de diseño son  $q_i = q_o = 150$  gpm y  $h = 6$  pies; supóngase también que, para que pasen 150 gpm por la válvula de salida la presión de aire sobre ésta debe ser de 9 psig. Si el flujo de entrada se incrementa,  $q_i$ , la respuesta del sistema con un controlador proporcionales como se ve en la figura 4.3. El controlador



lleva de nuevo a la variable a un valor estacionario pero este valor no es el punto de control requerido; la diferencia entre el punto de control y el valor de estado estacionario de la variable que se controla es la desviación. En la figura 4.3 se muestran dos curvas de respuesta que corresponden a dos diferentes valores del parámetro de ajuste  $K_c$ . En la figura se aprecia que cuanto mayor es el valor de  $K_c$ , tanto menor es la desviación, pero la respuesta del proceso se hace más oscilatoria; sin embargo, para la mayoría de los procesos existe un valor máximo de  $K_c$ , más allá del cual el proceso se hace inestable

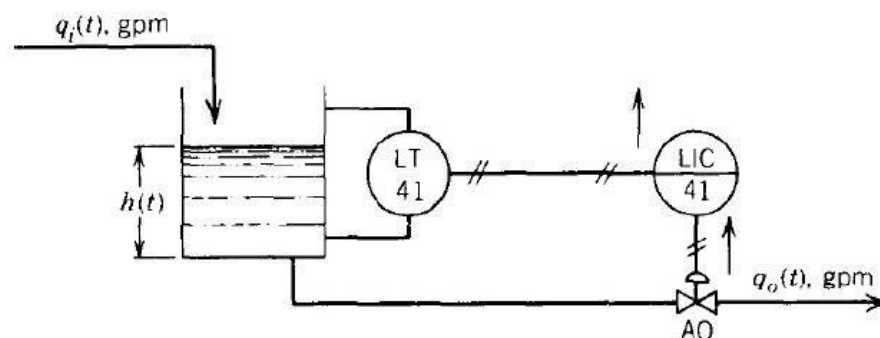


Figura 4.2 Circuito para control de nivel del líquido.

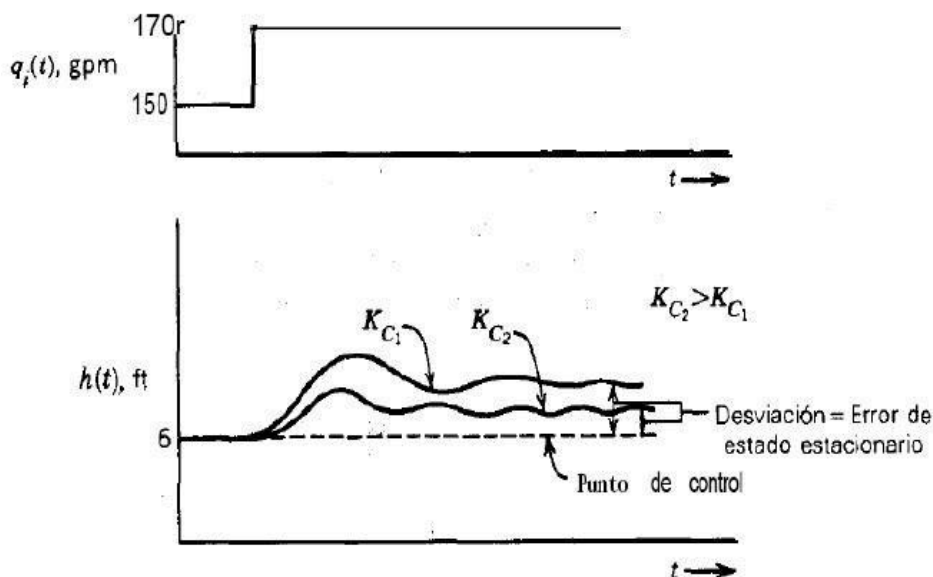


Figura 4.3 Respuesta del sistema de nivel de líquido.

## Controlador Proporcional Integral

Controlador proporcional-integral/ (PI). La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Esta nueva inteligencia o nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste y en consecuencia, el controlador se convierte en un controlador proporcionalintegral (PI). (López, 2012)

La siguiente es su ecuación descriptiva:

$$m(t) = m + K_c r(t) + K_c \tau_i \int r(t) dt \dots \dots \text{Ecuación 3.1} \quad m(t) = m + K_c e(t) + K_c \tau_i \int e(t) dt \dots \dots \text{Ecuación}$$

### 3.2

Donde  $\tau_i$  = tiempo de integración o reajuste minutos/repetición. Por lo tanto, el controlador PI tiene dos parámetros,  $K_c$  y  $\tau_i$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

Para entender el significado físico del tiempo de reajuste,  $\tau_i$ , considérese el ejemplo hipotético que se muestra en la figura 5.1, donde  $\tau_i$  es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional y, en consecuencia, las unidades son minutos/repetición. Tanto menor es el valor de  $\tau_i$ , cuanto más pronunciada es la curva de respuesta, lo cual significa que la respuesta del controlador se hace más rápida.

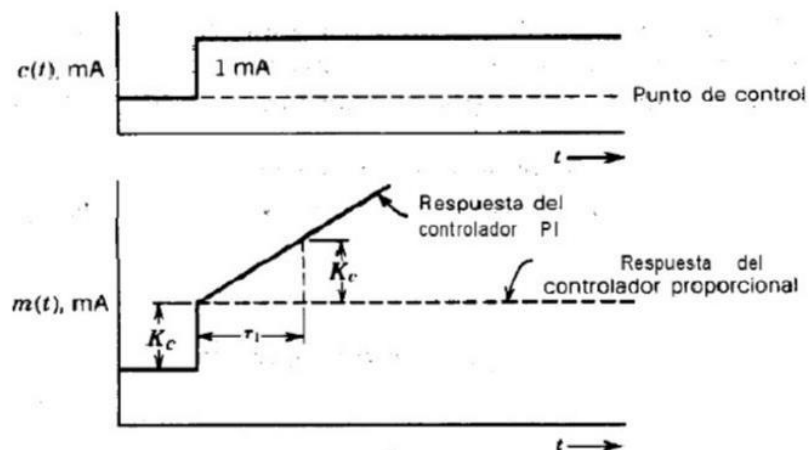


Figura 5.1 Respuesta del controlador proporcional integral (PI) (acción directa) a un Cambio escalón en el error.

Otra manera de explicar esto es mediante la observación de la ecuación (3.1), tanto menor es el valor de  $T_I$ , cuanto mayor es el término delante de la integral,  $K_{cT_I}$  y, en consecuencia, se le da mayor peso a la acción integral o de reajuste. De la ecuación (3.1) también se nota que, mientras está presente el término de error, el controlador se mantiene cambiando su respuesta y, por lo tanto, integrando el error, para eliminarlo; recuérdese que integración también quiere decir sumatoria. (López, 2012)

La función de Transferencia del controlador es:

$$U(s) = K_p(1 + T_I s) E(s) \dots\dots \text{Ecuación 3.3}$$

En donde  $K_p$ , es la ganancia proporcional y  $T_I$  se denomina tiempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_I$  son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de  $K_p$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral  $T_I$  se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. (López, 2012)

La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto. La figura 6.1(a) muestra un diagrama de bloques de un controlador proporcional más integral. Si la señal de error  $e(t)$  es una función escalón unitario, como se aprecia en la figura 6.1(b), la salida del controlador  $u(t)$  se convierte en lo que se muestra en la figura 6.1 (c).

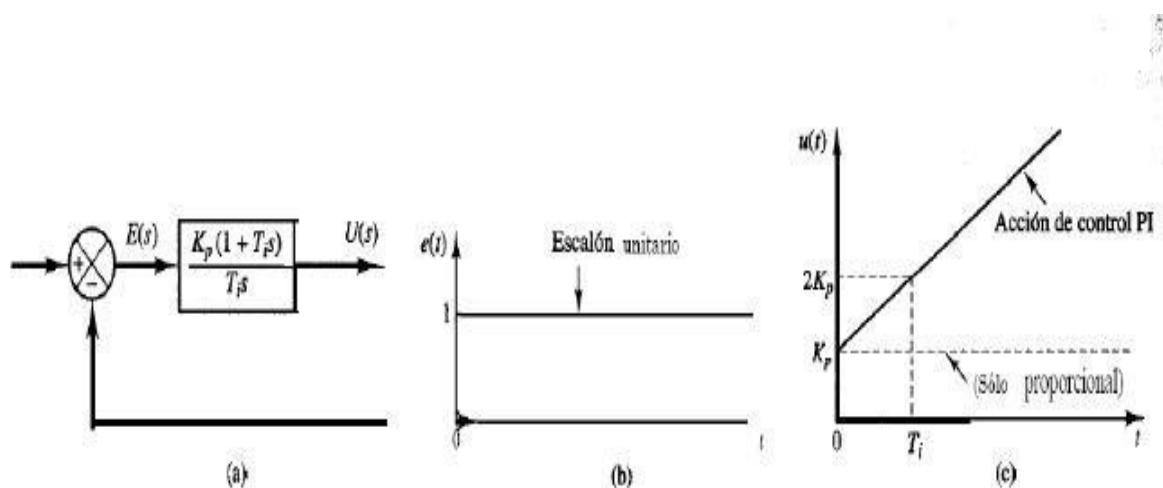


Figura 6.1 (a) Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral; (b) y (c) diagramas que muestran una entrada escalón unitario y la salida del controlador.

**Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).** Algunas veces se añade otro modo de control al controlador PI, este nuevo modo de control es la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o pre actuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada. La ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m_t = m + K_c e_t + K_c \tau_I \int e_t dt + K_c \tau_D \frac{de_t}{dt} \dots \dots \dots \text{Ecuación 4.1}$$

Donde  $\tau_D$  = rapidez de variación en minutos.

Por lo tanto, el controlador PID se tiene tres parámetros,  $K_c$  o PB,  $\tau_I$  o  $\tau_I R$  y  $\tau_D$  que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. Nótese que solo existe un parámetro para ajuste de derivación,  $\tau_D$ , el cual tiene las mismas unidades, minutos, para todos los fabricantes. Como se acaba de mencionar, con la acción derivativa se da al controlador la capacidad de anticipar hacia dónde se dirige el proceso, es decir, “ver hacia adelante”, mediante el cálculo de la derivada del error. La cantidad de “anticipación” se decide mediante el valor del parámetro de ajuste  $\tau_D$ .

Según Brito (2012), los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos típicos de ello son los circuitos de temperatura y los de concentración. Los procesos en que las constantes de tiempo son cortas (capacitancia pequeña) son rápidos y susceptibles al ruido del proceso, son característicos de este tipo de proceso los circuitos de control de flujo y los circuitos para controlar la presión en corrientes de líquidos. Considérese el registro de flujo que se ilustra en la figura 6.1, la aplicación del modo derivativo solo da como resultado la amplificación del ruido, porque la derivada del ruido, que cambia rápidamente, es un valor grande. Los procesos donde la constante de tiempo es larga (capacitancia grande) son generalmente amortiguados y, en consecuencia, menos susceptibles al ruido; sin embargo, se debe estar alerta, ya que se puede tener un proceso con constante de tiempo larga, por ejemplo, un circuito de temperatura, en el que el transmisor sea ruidoso, en cuyo caso se debe reparar el transmisor antes de utilizar el controlador PID.

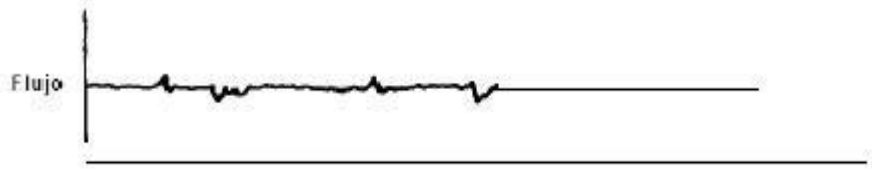


Figura 7.1 (4.1 Registro de un Circuito de Flujo.

La función de transferencia de un controlador PID “ideal” se obtiene apartir de la ecuación (4.2), la cual se reordena como sigue:

$$m_t - m = K_c e_t + K_c \tau_I (e_t - 0) dt + K_c \tau_D d(e_t - 0) dt \dots \dots \text{Ecuacion 4.2}$$

Definiendo las variables de desviación

$$M_t = m_t - m \quad E_t = e_t - 0$$

Se obtiene la transformada de Laplace y se reordena para obtener:

$$M_s E_s = K_c (1 + \tau_I s + \tau_D s) \dots \dots \dots \text{Ecuacion 4.3}$$

Esta función de transferencia se conoce como “ideal” porque en la práctica es imposible implantar el calculo de la derivada, por lo cual se hace una aproximación mediante la utilización de un adelanto/retardo, de lo que resulta la función de transferencia “real”:

$$M_s E_s = K_c (1 + \tau_I s + \tau_D s + 1 \alpha \tau_D s + 1) \dots \dots \dots \text{Ecuacion 4.4}$$

Los valores típicos de  $\alpha$  están entre 0.05 y 0.1. En resumen, los controladores PID tienen tres parámetros de ajuste: la ganancia o banda proporcional, el tiempo de reajuste o rapidez de reajuste y la rapidez derivativa. La rapidez derivativa se da siempre en minutos. Los controladores PID se recomiendan para circuitos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido. La ventaja del modo derivativo es que proporciona la capacidad de “ver hacia dónde se dirige el proceso”. (Brito, 2012)

## Métodos de sintonización de controladores PID

### Métodos de sintonización de controladores PID

Sintonizar un controlador PID significa establecer el valor que deben tener los parámetros de Ganancia (Banda Proporcional), Tiempo Integral (Reset) y Tiempo derivativo (Rate), para que el sistema responda en una forma adecuada. (Brito, 2012)

La primera etapa de todo procedimiento de sintonización consiste en obtener la información estática y dinámica del lazo. Existen diversos métodos para ajustar los parámetros de controladores PID, pero todos caen dentro de dos tipos:

- **Métodos en Lazo Cerrado:** la información de las características del lazo se obtiene a partir de un test realizado en lazo cerrado, usualmente con un controlador con acción proporcional pura.

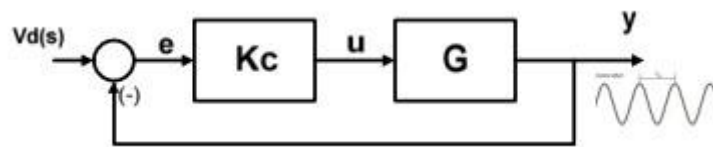


Figura 8.1 Métodos en lazo cerrado

- **Métodos en Lazo Abierto:** la características estáticas y dinámicas de la planta (Elemento Final de Control + Proceso + Transmisor) se obtienen de un ensayo en lazo abierto, generalmente la respuesta a un escalón (Curva de Respuesta).

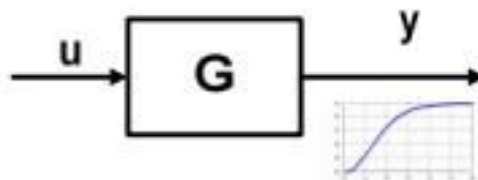


Figura 8.2 Métodos en lazo abierto

**Método de Ziegler y Nichols en Lazo Cerrado o de la Oscilaciones sostenidas.**

El Método consiste en obtener la respuesta de la señal medida a una perturbación (por ejemplo, un pulso en el set point) con controlador proporcional. (Alulema, 2006)

Se observa la respuesta y si es amortiguada, se incrementa la ganancia hasta lograr Oscilaciones Sostenidas (oscilación con amplitud constante).

La ganancia del controlador (proporcional) en este caso se denomina “Ganancia Última” y se nota  $K_{cu}$  y el período de la oscilación se llama “Período Último”  $\tau_u$ . Los valores recomendados de sintonización son:

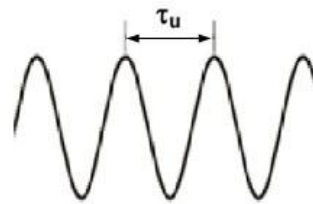


Figura 8.3 Método de las oscilaciones sostenidas

Tabla 1.1 Ganancia del controlador  $k_{cu}$

CONTROLADOR	$K_c$	$T_I$	$T_D$
P	$K_{cu}/2$	$\infty$	0
PI	$K_{cu}/2.2$	$\tau_u/1.2$	0
PID	$K_{cu}/1.7$	$\tau_u/2$	$\tau_u/8$

### Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado.

Este método, como el anterior, evalúa los parámetros del controlador a partir de la Ganancia Última  $K_{cu}$  y el Período Último  $\tau_u$ . Propone ajustes más relajados que el de Ziegler y Nichols y se aplica fundamentalmente a plantas que poseen un integrador. (Alulema, 2006)

Los valores recomendados de sintonización son:

Tabla 1.2 Valores recomendados de sintonización

CONTROLADOR	Kc	T <sub>I</sub>	T <sub>D</sub>
PI	K <sub>cu</sub> /3.2	$\tau_u/0.45$	0
PID	K <sub>cu</sub> /2.2	$\tau_u/0.45$	$\tau_u/6.3$

### Método de Ziegler y Nichols en Lazo Abierto o de la Curva de respuesta.

Por ser un método en lazo abierto, primero se realiza un ensayo en lazo abierto, introduciendo un escalón en la señal de control (salida del controlador que actúa sobre el elemento final de control) y se registra el transitorio de la variable medida o controlada (Curva de Respuesta).

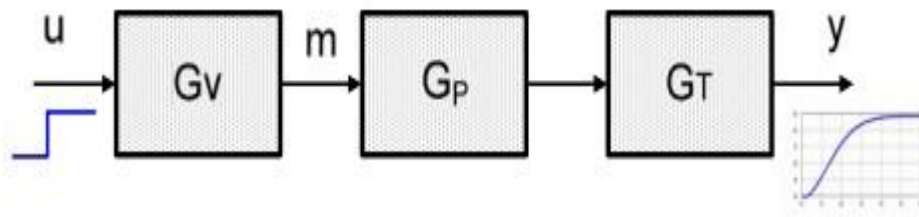


Figura 9.1 Método de la curva de respuesta

Aplicando el método del punto de inflexión, se obtiene una caracterización simplificada de la planta a controlar como una capacidad de primer orden más un tiempo muerto:

$$G(s) = G_V(s)G_P(s)G_T(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

El ajuste del controlador se hace según:

Tabla 1.3 Ajuste del controlador



CONTROLADOR	Kc	T <sub>I</sub>	T <sub>D</sub>
P	$\frac{1}{K} \left( \frac{\tau}{L} \right)$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.9}{K} \left( \frac{\tau}{L} \right)$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2}{K} \left( \frac{\tau}{L} \right)$	$\frac{L}{0.5}$	$\frac{L}{2}$

Esto es válido para relaciones  $L/\tau$  menores que 1.

### Método en Lazo Abierto de Cohen y Coon.

Se emplea el mismo test que el método anterior. La sugerencia para los parámetros tiene en cuenta el grado de autorregulación de la planta, medurado por la relación R:

$$R = \frac{L}{\tau}$$

Tabla 1.4 Parámetros según método en lazo abierto

CONTROLADOR	Kc	T <sub>I</sub>	T <sub>D</sub>
P	$\frac{1}{KR} \left[ 1 + \frac{1}{3}R \right]$	$\infty$	0
PI	$\frac{1}{KR} \left[ 0.9 + \frac{1}{12}R \right]$	$L \left[ \frac{30 + 3R}{9 + 20R} \right]$	0
PD	$\frac{1}{KR} \left[ \frac{5}{4} + \frac{1}{6}R \right]$	$\infty$	$L \left[ \frac{6 - 2R}{22 + 3R} \right]$
PID	$\frac{1}{KR} \left[ \frac{4}{3} + \frac{1}{4}R \right]$	$L \left[ \frac{32 + 6R}{13 + 8R} \right]$	$L \left[ \frac{4}{11 + 2R} \right]$

## Controlador PID 'paralelo'

Los controladores PID ideales están caracterizados por tener una función temporal que liga la señal de control  $u(t)$  con el error de la forma:

$$u(t) = u(0) + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_C T_D \frac{de(t)}{dt}$$

dando origen a la función de transferencia:

$$G_C(s) = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

Este tipo de controlador se conoce como controlador PID ideal, ya que corresponde a una función de transferencia de un sistema no-causal, y por lo consiguiente, no puede ser construido con elementos de la vida real (físicamente irrealizable). Empleando diagrama en bloques, la relación entre error y señal de control se puede describir:

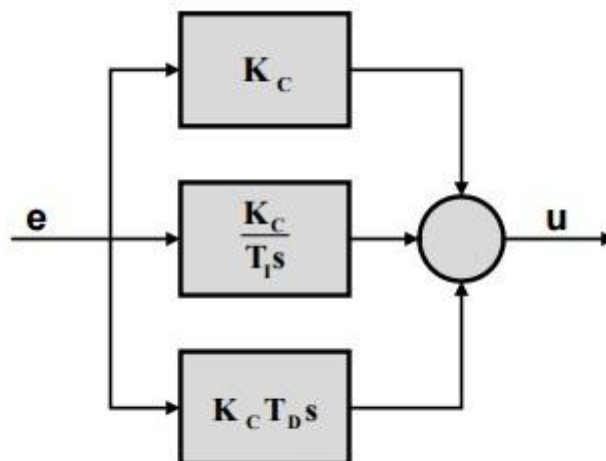


Figura 10.1 Controlador PIP Paralelo Relación entre error y señal de control

Quedando en evidencia que los efectos proporcionales, integrales y derivativos se aplican en forma paralela. Es por esta razón que a este tipo de controladores se los denomina PID tipo paralelo o PID no interactivo (ya que las acciones no interactúan entre sí).

([https://catedras.facet.unnt.edu.ar/controldeprocesos/wpcontent/uploads/sites/85/2016/02/T\\_P4A.pdf](https://catedras.facet.unnt.edu.ar/controldeprocesos/wpcontent/uploads/sites/85/2016/02/T_P4A.pdf))

Los controladores PID-Paralelo que ofrecen las firmas comerciales habitualmente tienen la función de transferencia:

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_D s}{\alpha T_D s + 1} \right)$$

Que corresponden a sistemas causales. Los fabricantes asignan al coeficiente  $\alpha$  valores entre 0.05 y 0.1 (y generalmente fijo). Con todo, debe tenerse presente que este algoritmo es el que se usa casi siempre en los textos de control automático para explicar la combinación de las tres acciones de control, aunque muchos de los controladores comerciales tienen algoritmos PID interactivo que se presenta a continuación.

### Controlador PID 'serie'

En los controladores PID 'serie' o 'interactivos', la acción derivativa se aplica primero y luego las acciones proporcional e integral siguiendo el esquema del diagrama en bloques.

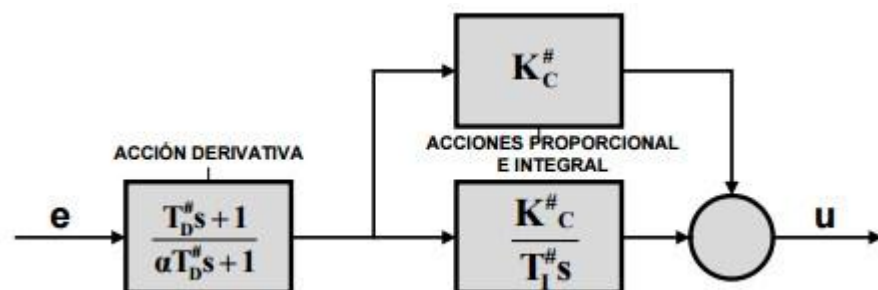


Figura 10.2 Controlador PIP Serie

que conduce a una función de transferencia

$$G_c(s) = K_c^# \left( \frac{T_i^# s + 1}{T_i^# s} \right) \left( \frac{T_D^# s + 1}{\alpha T_D^# s + 1} \right)$$

Se usó el signo # para denotar que corresponden a ganancia, tiempo integral y tiempo derivativo, pero no en el sentido tradicional (algoritmo paralelo), sino de esta

particular configuración. Como en el caso anterior,  $\square$  es una constante que varía según el fabricante, pero que está comprendida entre 0.05 y 0.1. Debe aclararse que la respuesta con ambos tipos de controladores da respuestas similares.

([https://catedras.facet.unt.edu.ar/controldeprocesos/wpcontent/uploads/sites/85/2016/02/T\\_P4A.pdf](https://catedras.facet.unt.edu.ar/controldeprocesos/wpcontent/uploads/sites/85/2016/02/T_P4A.pdf))

## CONTROL EN CASCADA

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación, por lo menos. Más exactamente, el control de cascada involucra sistemas de control de realimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro. Existen dos propósitos para usar control cascada: 1. Eliminar el efecto de algunas perturbaciones haciendo la respuesta de regulación del sistema más estable y más rápida. 2. Mejorar la dinámica del lazo de control.

### Estructura

La estructura de control en cascada tiene dos lazos un lazo primario con un controlador primario también llamado “maestro”  $K_1(s)$  y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado “esclavo”  $K_2(s)$ , siendo la salida del primario el punto de consigna del controlador secundario La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso. (<https://es.scribd.com/document/333177579/resumen-controlcascada-pdf>)

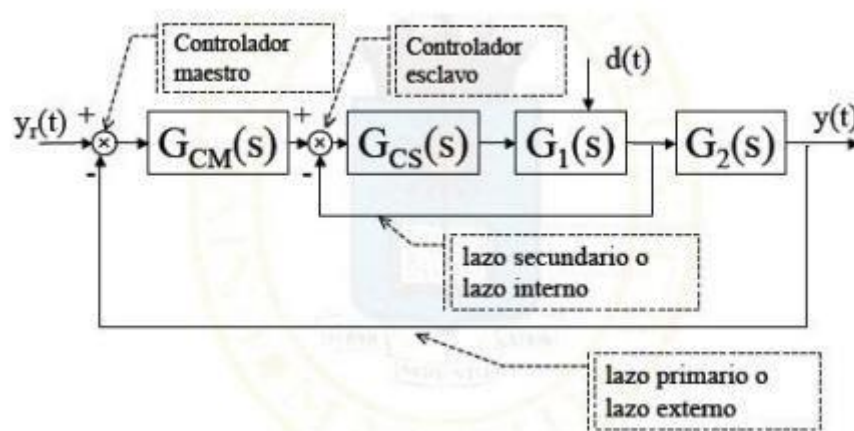


Figura 11.1 Estructura de control en cascada

### **Ventajas del control en cascada.**

- a) Produce estabilidad en la operación.
- b) Las perturbaciones en el lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
- c) Cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso es compensada por su propio lazo.
- d) Las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.
- e) El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.
- f) Es menos sensible a errores de modelado.
- g) Incremento de la capacidad de producción.

### **Limitaciones de aplicación del control en cascada**

- a) Es aplicable solo cuando pueden obtenerse mediciones de variables adicionales de proceso.
- b) Requiere medir las perturbaciones en forma explícita, y además es necesario un modelo para calcular la salida del controlador.
- c) En algunas aplicaciones la variable controlada no puede medirse y la realimentación no puede realizarse.

### **Diseño de Control en Cascada**

Los criterios para el diseño de control en cascada son:

**Puede ser considerado:**

1. Cuando el control realimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado.
2. La medida de la variable es disponible.

**La variable secundaria debe satisfacer los siguientes criterios:**

1. Debe indicar la ocurrencia de una importante perturbación.
2. Debe haber una relación causal entre la variable manipulada y la segunda variable.

La variable secundaria debe tener una dinámica más rápida que la variable primaria. Típicamente  $t_p$  (tiempo pico) debe ser mayor que  $3t_s$  (constante de tiempo del proceso secundario).

([http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/Libros/uni\\_02/control.pdf](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/Libros/uni_02/control.pdf))

**Implementación de Controlador en Cascada**

Una cuestión importante en la implementación de control en cascada es cómo encontrar la variable secundaria controlada más ventajosa, es decir, determinar cómo el proceso puede ser mejor dividido.

(<https://es.scribd.com/document/333177579/resumencontrol-cascada-pdf>)

La selección de la variable controlada secundaria es tan importante en un sistema de control en cascada que es muy útil formalizar algunas reglas que ayuden a la selección.

Regla 1.- Diseñar el lazo secundario de manera que contenga las perturbaciones más serias.

Regla 2.- Hacer el lazo secundario tan rápido como sea posible incluyendo solamente los menores retrasos del sistema completo de control.

Regla 3.- Seleccionar una variable secundaria cuyos valores estén definidamente y fácilmente relacionados a los valores de la variable primaria.

Regla 4.- Incluir en el lazo secundario tantas perturbaciones como sea posible, manteniéndolo al mismo tiempo, relativamente rápido.

Regla 5.- Escoger una variable secundaria de control que permita al controlador secundario operar a la ganancia más alta posible (la más baja banda proporcional). Esto es difícil de predecir.

### **Entonamiento de controladores**

En la práctica industrial los reguladores de un sistema de control en cascada son normalmente reguladores realimentados estándares tipo P, PI, o PID. La sintonía de los dos reguladores se efectúa, igual que en controladores en configuración simple, pero en dos etapas.

([http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/Libros/uni\\_02/control.pdf](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/Libros/uni_02/control.pdf))

PASOS:

#### **SINTONÍA DEL BUCLE SECUNDARIO**

- ☐ Obtener un modelo de la parte del proceso incluida en el secundario (modelo de conocimiento o modelo experimental)
- ☐ Sintonizar el controlador secundario por cualquiera de los métodos conocidos (normalmente se utiliza un PI ya que el secundario debe ser un bucle rápido)

#### **SINTONÍA DEL BUCLE PRIMARIO**

- ☐ Obtener un modelo de la variable controlada a cambios en el punto de consigna del controlador secundario (con el bucle secundario cerrado o en automático) ☐ Se diseña el regulador maestro sobre este sistema equivalente.
- ☐ Sintonizar el controlador primario por alguno de los métodos conocidos.

## Comparación con control por realimentación

Según Figueira (2016), en ocasiones el esquema de control por retroalimentación simple debe ser modificado para enfrentar condiciones especiales de perturbación en el sistema y las características pobres en estabilidad y rapidez de respuesta que éstas pueden reproducir. Estableciendo una comparación es necesario, en primer lugar, precisar el diagrama de bloque y los componentes del esquema por retroalimentación simple:

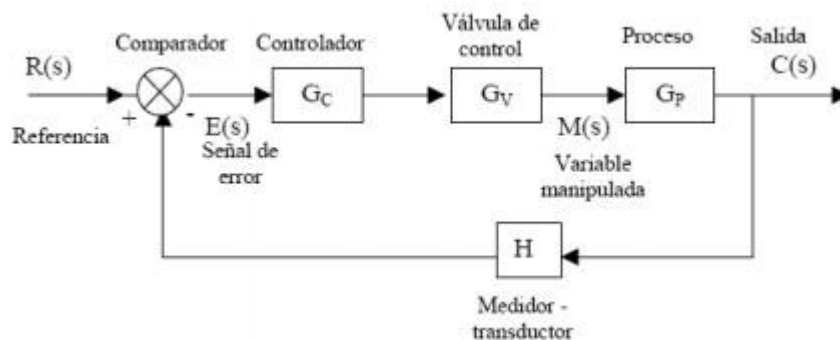


Figura 11.2 Diagrama de bloques del esquema en retroalimentación Simple

Considerando el siguiente ejemplo:

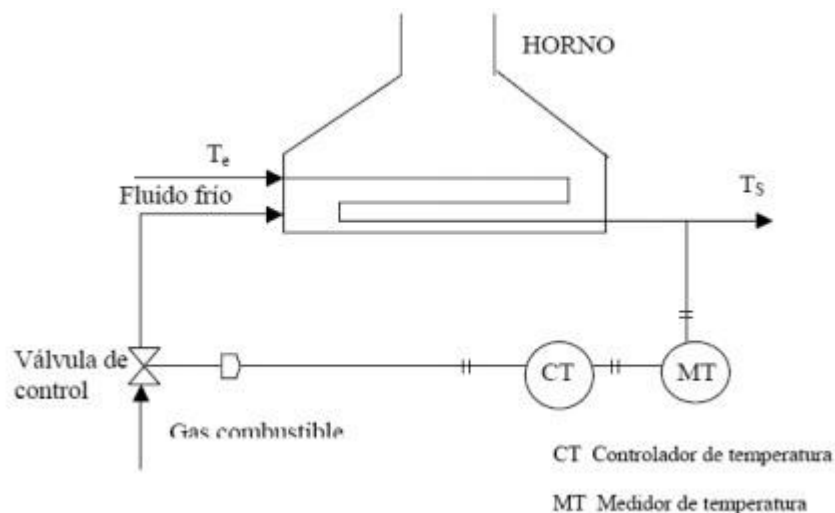


Figura 11.3 Diagrama de bloques del esquema en retroalimentación Simple

Constituido por el horno en el cual se quema gas, para calentar una cierta corriente y elevar su temperatura desde  $T_e$  hasta  $T_s$ . Suponiendo que disminuye de pronto la



presión de alimentación del gas combustible la caída de presión a través de la válvula será menor de manera que disminuirá el flujo de gas. Con el controlador de temperatura por retroalimentación simple, no se hará ninguna corrección hasta que la temperatura final a la salida se vea finalmente disminuida. (Figueira, 2016). De esta forma, toda la operación del horno se ve alterada por la perturbación.

Con el sistema de control en cascada (fig. 11.4), el controlador de flujo sobre la corriente de gas combustible detectará inmediatamente la disminución de gas y abrirá la válvula de control para hacer que el flujo vuelva a su valor requerido. El horno no se ve afectado entonces por la perturbación

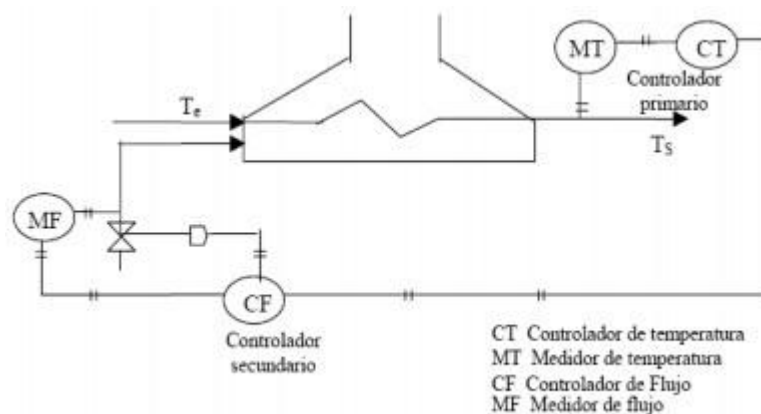


Figura 11.4 Sistema de control en cascada

El diagrama de bloques correspondiente a esta última situación se muestra en la figura siguiente. Así, el control en “cascada” tiene dos controladores por retroalimentación.

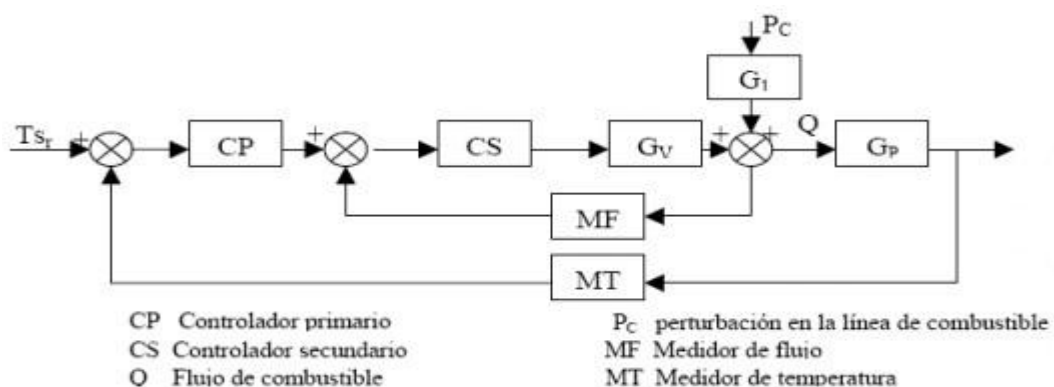


Figura 11.5 Diagrama de bloques del sistema de control en cascada

Es importante notar las siguientes diferencias entre las estructuras de control de tipo feedback convencional y cascada: (Figueira, 2016)

- El esquema de control feedback sólo emplea un controlador, mientras que en el esquema de control en cascada se emplean dos controladores., es decir necesita una mayor inversión en instrumentación
- En el esquema de control feedback el set-point del controlador se fija externamente (normalmente lo fija el operador del proceso). En el esquema de control en cascada el set-point de la variable a controlar sigue siendo fijado de manera externa. Sin embargo, el set-point del controlador esclavo es fijado por el controlador maestro. Es decir, la salida o resultado que produce el controlador maestro es simplemente el set-point al que debe operar el controlador esclavo.
- La velocidad de respuesta del sistema se mejora en el control en cascada, si el lazo secundario tiene una respuesta más rápida que la planta interna.

## DIAGRAMA DE BLOQUE Y DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN

a) Cascada Temperatura-Presión:

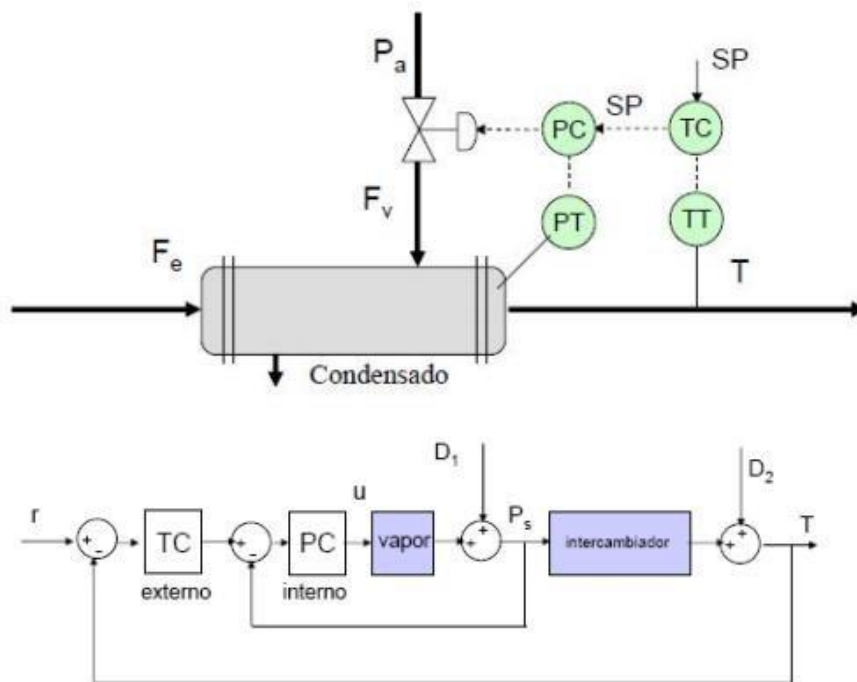


Figura 11.6 Diagrama de bloque y diagrama de tubería e instrumentación

El regulador externo (temperatura-TC) fija la consigna del regulador interno (presión-PC) cuyo objetivo es corregir el efecto de las perturbaciones (por ejemplo, variaciones en la caída de presión en la válvula) sobre la presión en el interior del tanque (Ps) antes de que afecten de forma significativa a la temperatura T. (Figueira, 2016)

## **Sistemas scada.**

Damos el nombre de SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión de Datos) a cualquier software que permita, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo. (Rodríguez, 2007)

El primer tipo de SCADA se utilizó en aplicaciones tales como tuberías de gas y líquidos, la transmisión y distribución de energía eléctrica y en los sistemas de distribución de agua, para su control y monitoreo automático (Shaw, 2006).

No se trata de un sistema de control, sino de una utilidad software de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interfase entre niveles de control (PLC) y los de gestión, a un nivel superior.

Bailey y Wright (2003) mencionan que un SCADA abarca la recolección de la información y la transferencia de datos al sitio central, llevando a cabo el análisis y el control necesario, para luego mostrar la información sobre una serie de pantallas de operador y de esta manera permitir la interacción, cuando las acciones de control requeridas se transportan de nuevo al proceso.

Según Gómez, Reyes y Guzmán del Río (2008), en su función de sistemas de control, los SCADA ofrecen una nueva característica de automatización que realmente pocos sistemas tienen: la de supervisión.

Los objetivos para que su instalación sea perfectamente aprovechada son los siguientes:

- Funcionalidad completa de manejo y visualización en sistema operativo Windows sobre cualquier PC estándar.
- Sencillez de instalación, sin exigencias de hardware elevada, fácil de utilizar e interfaces amigables con el usuario.
- Permitir integración con las herramientas ofimáticas y de producción.

- Fácilmente configurable y escalable, debe ser capaz de crecer y adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Ser independiente del sector y la tecnología.
- Funciones de mando y supervisión integradas.
- Comunicaciones flexibles para poder comunicarse con total facilidad y de forma transparente al usuario con el equipo de planta y con el resto de la empresa (redes locales y de gestión).

La topología de un sistema Scada (su distribución física) variará adecuándose a las características de cada aplicación. Unos sistemas funcionarán bien en configuraciones de bus, otros en configuraciones de anillo. Unos necesitarán equipos redundantes debido a las características del proceso, etc.

## OBJETIVOS

Los sistemas Scada se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando. Entre sus objetivos podemos destacar:

**Economía:** es más fácil ver qué ocurre en la instalación desde la oficina que enviar a un operario a realizar la tarea. Ciertas revisiones se convertirán en innecesarias.

**Accesibilidad:** un parque eólico al completo (velocidad de cada rotor, producción de electricidad), lo tenemos en un clic de ratón encima de la mesa de trabajo. Será posible modificar los parámetros de funcionamiento de cada aerogenerador, poniendo fuera de servicio los que den indicios de anomalías; consultar el estado de las estaciones transformadoras del parque, detener los molinos que no sean necesarios, etc.

**Mantenimiento:** la adquisición de datos materializa la posibilidad de obtener datos de un proceso, almacenarlos y presentarlos de manera inteligible para un usuario no especializado. La misma aplicación se puede programar de manera que nos avise cuando se aproximen las fechas de revisión o cuando una máquina tenga más fallos de los considerados normales.

**Ergonomía:** es la ciencia que procura hacer que la relación entre el usuario y el proceso sea lo menos tirante posible. Los modernos ordenadores con sus prestaciones gráficas intentan sustituir a los grandes paneles repletos de cables pilotos y demás aparellaje informativo. Pero hay un problema que aún persiste: cómo presentar toda esa información sin aburrir ni fatigar al usuario.

**Gestión:** todos los datos recopilados pueden ser valorados de múltiples maneras mediante herramientas estadísticas, gráficas, valores tabulados, etc., que permitan explotar el sistema con el mejor rendimiento posible.

**Flexibilidad:** cualquier modificación de alguna de las características del sistema de visualización (añadir el estado de un contador de piezas, realizar algún cálculo) no significa un gasto en tiempo y medios, pues no hay modificaciones físicas que requieran la instalación de un cableado o del contador.

**Conectividad:** se buscan sistemas abiertos, es decir, sin secretos ni sorpresas para el integrador. La documentación de los protocolos de comunicación actuales permite la interconexión de sistemas de diferentes proveedores y evita la existencia de lagunas informativas que puedan causar fallos en el funcionamiento o en la seguridad.

## **Prestaciones**

El paquete SCADA, en su vertiente de herramienta de interfase hombre-máquina, comprende toda una serie de funciones y utilidades encaminadas a establecer una comunicación lo más clara posible entre el proceso y el operador:

Entre las prestaciones de una herramienta de este tipo destacan:

### **□ La monitorización**

Representación de datos en tiempo real a los operadores de planta. Se leen los datos de los autómatas (temperaturas, velocidades, detectores, etc.). Una máquina simple, una instalación hidroeléctrica, un parque eólico, pueden ser vigilados desde muchos kilómetros de distancia.

### **□ La supervisión**

Supervisión, mando y adquisición de datos de un proceso y herramientas de gestión para la toma de decisiones (mantenimiento predictivo, por ejemplo). Tienen además la capacidad de ejecutar programas que puedan supervisar y modificar el control establecido

y, bajo ciertas condiciones, anular o modificar tareas asociadas a los autómatas. Evita una continua supervisión humana.

#### □ **La adquisición de datos de los procesos en observación**

Un sistema de captación solar se puede observar mediante herramientas registradoras y obtener así un valor medio de la irradiación en la zona, guardando los valores obtenidos y evaluándolos a posterioridad (los parámetros de velocidad y temperatura de cada máquina de la línea se almacenan para su posterior proceso).

#### □ **La visualización de los estados de las señales Del sistema (alarmas y eventos).**

Reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en la planta y su inmediata repuesta en conocimiento a los operarios para efectuar las acciones correctoras pertinentes. Además, los paneles de alarma pueden exigir alguna acción de reconocimiento por parte del operario, de forma que queden registradas las incidencias.

#### □ **El mando**

Posibilidad de que los operadores puedan cambiar consignas u otros datos claves del proceso directamente desde el ordenador (marcha, paro, modificación de parámetros, etc.) Se escriben datos sobre los elementos de control.

#### □ **Garantizar la seguridad de los datos**

Tanto el envío como la recepción de datos deben de estar suficientemente protegidos de influencias no deseadas, intencionadas o no (fallos en la programación, intrusos, situaciones inesperadas, etc.).

#### □ **Garantizar la seguridad en los accesos**

Restringiendo zonas de programa comprometidas a usuarios no autorizados, registrando todos los accesos y acciones llevadas a cabo por cualquier operador.

### **Ventajas**

Según Rodríguez (2007), cuando hablamos de un sistema SCADA no hay que olvidar que hay algo más que las pantallas que nos informan de cómo van las cosas en

nuestra instalación. Tras éstas se encuentran multitud de elementos de regulación y control, sistemas de comunicaciones y múltiples utilidades de software que pretenden que el sistema funcione de forma eficiente y segura.

Las ventajas más evidentes de los sistemas de control automatizado y supervisado (SCADA) podemos enumerarlas a continuación: (Rodríguez, 2007)

- El actual nivel de desarrollo de los paquetes de visualización permite la creación de aplicaciones funcionales sin necesidad de ser un experto en la materia.
- Un sistema PLC está concebido para trabajar en condiciones adversas, proporcionando robustez y fiabilidad al sistema que controla.
- La modularidad de los autómatas permite adaptarlos a Las necesidades actuales y ampliarlos posteriormente si es necesario.
- Cualquier tipo de sensores y actuadores puede integrarse en un programa de PLC mediante las múltiples tarjetas de adquisición disponibles (tensión, corriente, sondas de temperatura, etc.).
- Gracias a las herramientas de diagnóstico se consigue una localización más rápida de errores. Esto permite minimizar los periodos de paro en las instalaciones y repercute en la reducción de costes de mantenimiento.
- Los programas de control pueden documentarse convenientemente de manera que puedan ser fácilmente interpretados por los técnicos de mantenimiento.
- Un conjunto de manuales de usuario y documentación técnica adecuados permitirán el manejo satisfactorio por terceras personas.
- Los sistemas de diagnóstico implementados en los elementos de control informan continuamente de cualquier incidencia en los equipos.
- Los programas de visualización pueden presentar todo tipo de ayuda al usuario, desde la aparición de una alarma hasta la localización de la causa o la parte de esquema eléctrico implicada en la misma. Esto permite reducir los tiempos de localización de averías al proporcionarse información sobre el origen y las causas de los fallos.
- Generación y distribución automática de documentación. El sistema de visualización puede recoger los datos del autómata y presentarlos en formatos

fácilmente exportables a otras aplicaciones de uso común, tales como hojas de cálculo.

- La integración de sistemas es rápida gracias a los sistemas de comunicación estandarizados.
- La tecnología Web permite el acceso desde cualquier punto geográfico a nuestro sistema de control.
- Los protocolos de seguridad permiten una gestión segura y eficiente de los datos, limitando el acceso a personas no autorizadas.
- Aumento de calidad del producto mediante las herramientas de diagnóstico. El operador es notificado en el momento en que se detecta una incidencia.
- La reducción de personal permite menor número de equipos de mantenimiento, más reducidos y mejor coordinados gracias a la información proveniente de las estaciones remotas, evaluada en el centro de control.
- Posibilidad de mantenimiento por parte de suministradores locales de servicios.
- El nivel de descentralización va en aumento, apostando por la modularidad. Esto permite una mayor disponibilidad, pues las funciones de control se pueden repartir y/o duplicar.
- La distribución de recursos y control sobre la red permite una mejor coordinación entre las estaciones remotas en caso de fallos en una de ellas. (Rodríguez, 2007)

### **El entorno**

La automatización de sistemas desde el estado inicial de aislamiento productivo, ha pasado a formar parte del ámbito corporativo y se engloba dentro del paquete empresarial con la finalidad de optimizar la productividad y mejorar la calidad.





Figura 12.1 Estructura corporativa

En la figura 12.1 se Presenta la estructura corporativa dividida en tres niveles, que engloban las funciones principales que se desarrollan en cada uno de ellos:

- ERP (*Enterprise Resource Planning* o Planificación de Recursos Empresariales) engloba la parte de gestión: finanzas, compras, ventas, logística.
- MES (*Manufacturing Execution System* o Gestión de la Producción): comprende la gestión de calidad, documentación, gestión de producción, mantenimiento y optimización.
- CONTROL: engloba toda la parte de automatización y control de procesos.

Estos niveles engloban los diferentes flujos de información que se dan entre los elementos de cada uno de ellos (comunicación horizontal) y el intercambio de información que se da entre los diferentes niveles (comunicación vertical).

La finalidad de este organigrama es disponer de la máxima información posible sobre el estado operativo global de la empresa para planificar las acciones de producción:

- Conocer la demanda prevista para planificar la producción a corto, medio y largo plazo, y coordinar compras y logística (ERP).

- Conocer las existencias de material disponibles para aplicar en el proceso productivo y decidir si hay que planificar nuevas compras (MES, Gestión de Almacén).
- Coordinar los ciclos de Mantenimiento Preventivo para conocer la disponibilidad de maquinaria y la capacidad operativa durante el tiempo de producción previsto (MES, Mantenimiento).
- Conocer el estado operativo de planta (CONTROL, Scada)

### **Criterios de selección y diseño**

Desde la invención de los primeros automatismos, los sistemas de control han ido creciendo en complejidad y han invadido todos los campos, desde las máquinas expendedoras, hasta los grandes sistemas de gestión de energía. Han pasado a ser una parte integrante de nuestras vidas y sólo nos apercebimos de su verdadera magnitud cuando éstos dejan de funcionar correctamente debido a un mal diseño o a situaciones imprevistas, que es casi lo mismo. (Rodríguez, 2007)

Un sistema de control cualquiera es útil, evidentemente, mientras funcione correctamente. En caso contrario puede crear problemas de forma directa (mal funcionamiento de un sistema de potabilización de agua), o indirecta (el fallo del control sobre una estación transformadora puede hacer que el sistema de control central provoque un efecto dominó al sobrecargar las estaciones adyacentes, que no están preparadas para ello).

La reacción de un sistema ante situaciones inesperadas determinará su grado de fiabilidad, es decir, el tiempo de operación del mismo, y puede mejorarse mediante el uso de técnicas de diseño adecuadas.

Los parámetros que influyen en las posibilidades de supervivencia se pueden englobar bajo los siguientes denominadores:

- Disponibilidad
- Robustez
- Seguridad

- Prestaciones
- Mantenibilidad
- Escalabilidad

## **Disponibilidad**

Por disponibilidad de un sistema informático se entiende la medida en la que sus parámetros de funcionamiento se mantienen dentro de las especificaciones de diseño. Se basará en dos pilares fundamentales: hardware y software.

### **Hardware**

Es el elemento físico y su estrategia se fundamenta básicamente en el concepto de redundancia, entendida como la capacidad de un elemento de asumir las funciones de otro de forma transparente al sistema que sirve (como si al pinchar una rueda, otra se colocase automáticamente en su lugar sin afectar a la marcha).

El principio de redundancia se aplica a todos los niveles, desde componentes individuales hasta sistemas enteros (fuentes de alimentación, *backup* de datos, sistemas de comunicaciones). De esta manera es posible continuar trabajando en caso de fallo de uno de los componentes.

Aquí se aplica también el concepto de sustitución en caliente. Se puede realizar el mantenimiento y cambiar los componentes defectuosos sin necesidad de detener un sistema.

En los equipos de bombeo, generalmente, se colocan dos bombas trabajando en alternancia, Cada una trabaja durante un tiempo determinado mientras la otra está parada. También, si una falla o necesita mantenimiento, la otra puede seguir trabajando.

En el ámbito de las comunicaciones entre equipos se utiliza. Entre otros sistemas, la topología en anillo de fibra óptica. En esta configuración dos anillos concéntricos de fibra sirven de camino a la información que se intercambia entre estaciones:

- En funcionamiento normal el tráfico se puede repartir entre los dos anillos.



Figura 12.2 Sistema de anillo concéntrico

- En caso de rotura del anillo en cualquier punto, las estaciones más próximas a la rotura tienen la capacidad suficiente para redirigir el tráfico de un anillo a otro, evitando así la interrupción de las comunicaciones.

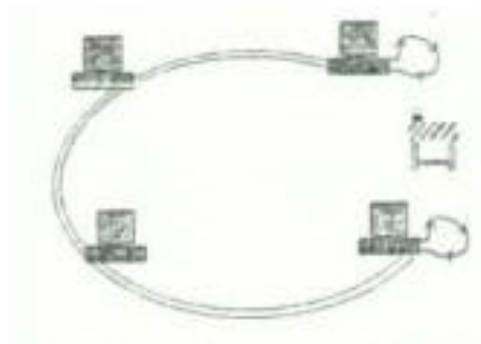


Figura 12.3 Sistema de anillo concéntrico: rotura

En los equipos trabajando en paralelo uno de ellos hace de espejo. Si el equipo principal falla el de reserva asume sus funciones hasta que el problema se resuelve.

En este momento se realiza una sincronización del equipo entrante con el suplente y queda el sistema completamente operativo.

Otra posibilidad más tolerante a fallos es la que aplica la redundancia múltiple, modalidad en la cual hay más de un equipo de reserva trabajando en segundo plano que se mantiene actualizado por si aparecen fallos en uno o más equipos.

## **Robustez**

Ante un fallo de diseño, un accidente o una intrusión, un sistema eficiente debe de poder mantener un nivel de operatividad suficiente como para mantener unos mínimos de servicio.

### **Si las cosas empiezan a ir mal, ¿cuánto aguantará el sistema antes de empezar a fallar?**

Es lo que llamaríamos el plan de contingencia. Si una parte de un sistema queda aislada, accidentalmente o no, la parte aislada debe tener la suficiente capacidad de autogestión como para poder mantener un mínimo de control sobre su área de influencia.

Por ejemplo, una estación de mecanizado de piezas de diferentes medidas, en caso de fallo de comunicaciones, activará una rutina de pedidos locales en función de los últimos valores de existencias recibidos, mecanizando los tipos de piezas que se estimen más necesarios.

Un sistema de bombeo de varios niveles verificará que los datos que recibe son coherentes y que no provocarán problemas de escasez o excesos en los diferentes depósitos; o problemas en los equipos y, en caso de no serlo, tomar la iniciativa, anulándolos (autocontrol).

En el caso de ocurrir el fallo grave en el sistema central (MTU) puede establecerse un protocolo de desconexión de las estaciones remotas, pasando éstas al estado de autogestión (esclavos inteligentes) hasta que la Unidad Central esté de nuevo habilitada y pueda retomar el control.

## **Seguridad**

Un fallo en el diseño, un usuario malintencionado o una situación imprevista podrían alterar los parámetros de funcionamiento de un sistema.

Hoy en día cualquier sistema de control puede utilizar uno o varios métodos de comunicación para enlazar todos los puntos de control de un proceso y, en el momento en que se utilizan sistemas de comunicación que implican el acceso desde múltiples puntos, no siempre dentro de la empresa, es posible que alguno de estos accesos sea no deseado.

Ante estas situaciones el sistema debe permitir establecer estrategias para prevenir, detectar y defenderse de acciones no deseadas (intencionadas o no):

- Mediante el establecimiento de toda una serie de derechos y las jerarquías de usuario, que limitan el acceso a datos sensibles mediante contraseñas. Además, el acceso mediante usuarios permite establecer un archivo de accesos para conocer en todo momento quién ha cambiado algo en el sistema de control.
- Encriptando los datos que se emiten desde las estaciones remotas (*Remote Terminal Units*) o el control central (*Master Terminal Unit*).
- Filtrando toda la información recibida, comprobando si su origen es conocido o no.
- Mediante el uso de códigos preestablecidos que se envían con los datos y se comprueban en el centro de control antes de ser aceptados.
- Mediante las direcciones de los elementos emisores (por ejemplo, las direcciones IP).
- Fijando unos caminos de acceso predeterminados para la información, provistos de las herramientas necesarias para asegurar la fiabilidad de la información que los atraviesa (los puertos de acceso a un sistema).
- Una vez los datos ya se encuentran dentro del sistema, éste debe ser capaz de detectar y reaccionar ante incoherencias en los mismos, por ejemplo, mediante el uso de datos predefinidos que eviten problemas en el funcionamiento normal del sistema, o incluso puedan provocar daños en alguno de sus componentes (por ejemplo, mediante el filtrado de variables).
- Programas de vigilancia de otros programas, que ejecutan acciones predefinidas en caso de detectarse un problema (*watchdog* o perro guardián). Muchos autómatas tienen salidas que se pueden configurar para indicar una anomalía. En caso de fallo detectado en la CPU, dicha salida se activa y sirve para notificar este estado mediante un aviso.

## **Prestaciones**

Básicamente se refieren al tiempo de respuesta del sistema. Durante el desarrollo normal del proceso la carga de trabajo de los equipos y el personal se considera que es mínima y está dentro de los parámetros que determinan el tiempo real de un sistema.

En caso de declararse un estado de alerta, la actividad que se desarrolla aumenta de forma considerable la carga de los equipos informáticos y del personal que los maneja. El equipo debe poder asimilar toda la información que se genera, incluso bajo condiciones de trabajo extremas, de manera que no se pierda información aunque su proceso y presentación no se realicen en tiempo real.

### **Mantenibilidad**

Los tiempos de mantenimiento pueden reducirse al mínimo si el sistema está provisto de unas buenas herramientas de diagnóstico que permitan realizar tareas de mantenimiento preventivo, modificaciones y pruebas de forma simultánea al funcionamiento normal del sistema.

### **Escalabilidad**

Este concepto está básicamente relacionado con la posibilidad de ampliar el sistema con nuevas herramientas o prestaciones y los requerimientos de tiempo necesarios para implementar estas ampliaciones, debido a:

- Espacio disponible.
- Capacidad del equipo informático (memoria, procesadores, alimentaciones).
- Capacidad del sistema de comunicaciones (limitaciones físicas, protocolos, tiempo de respuesta).

La aplicación de control debe poder evolucionar, adaptándose al entorno que controla, de manera que funcione de forma eficiente sin importar el tipo de equipamiento el volumen de datos.

Un sistema Scada debe poder ampliarse y actualizarse. Puede empezar con un único servidor para todas tareas (Scada, Archivo, Alarmas, Comunicaciones). El problema, aquí, reside en que todo pasa por un único punto que es el talón de Aquiles del sistema.

Un planteamiento correcto en el diseño permitirá un mejor aprovechamiento de los recursos. Por ejemplo, si se decide implementar los sistemas de control de las instalaciones de forma centralizada, será más costoso realizar una ampliación posterior, pues tendremos que acabar modificando el hardware, cambiando el servidor aquel que debe ser más rápido, debido a las nuevas exigencias, o el software, modificando la aplicación.

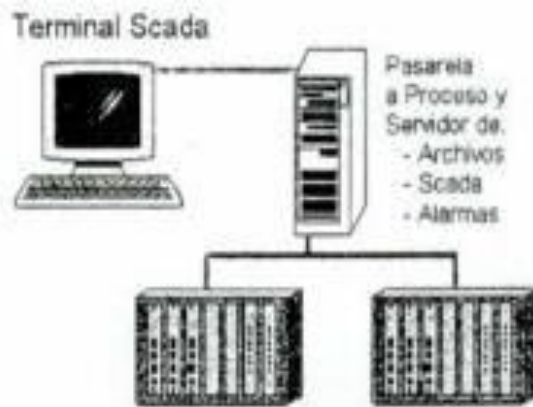


Figura 13.1 Sistema Scada escalable paso 1

En cambio, de forma distribuida, la ampliación posterior será más sencilla, pues podemos empezar con un único servidor que realice todas las tareas y, cuando la situación lo requiera, ir añadiendo más servidores (de menor coste, pues las tareas serán más concretas) que sirvan de apoyo al inicial compartiendo tareas del primero. Aquí tenemos el problema principal de la centralización, un fallo en el servidor (el único) provocará una caída del sistema entero, mientras que si hay varios servidores compartiendo tareas el sistema será más tolerante a fallos. (Rodríguez, 2007)

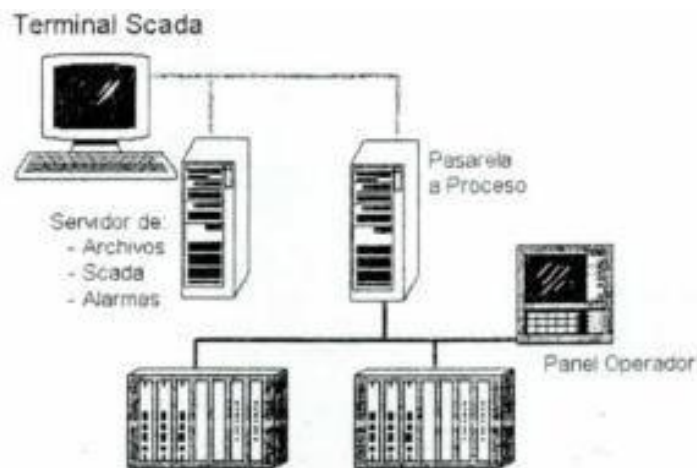


Figura 13.2 Sistema Scada escalable paso 2



En la figura se puede observar que el servidor inicial se ha descargado del trabajo de comunicaciones con la Planta. En este caso se podría implementar un servidor de apoyo para archivos, alarmas y Scada en el Servidor de comunicaciones por si fallase el Servidor principal (a la izquierda, en la figura anterior). (Rodriguez, 2007)

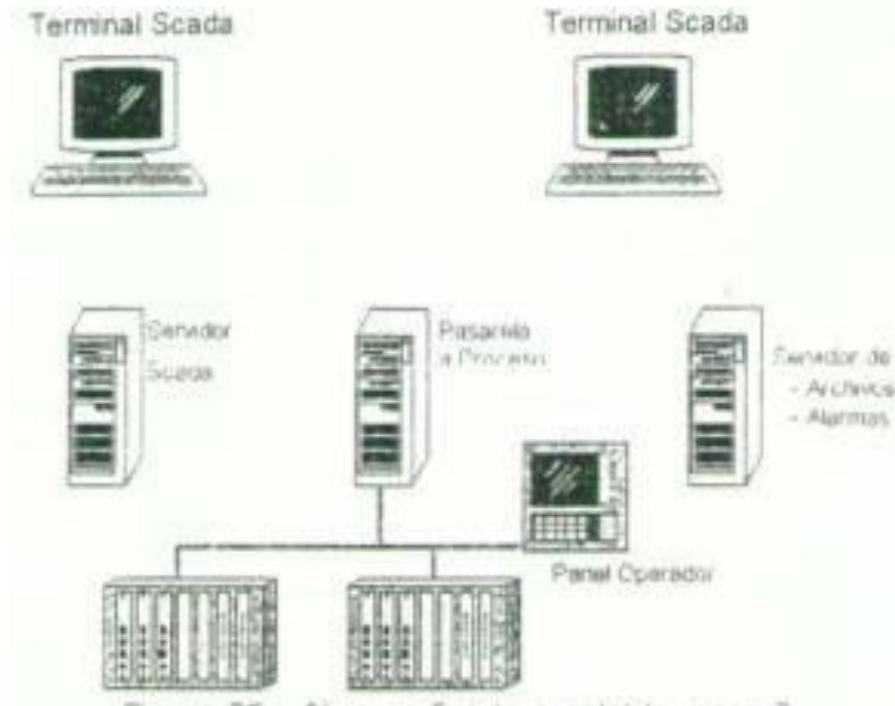


Figura 13.3 Sistema Scada escalable paso 3

La tendencia es la de atomizar los grandes sistemas de supervisión y control en multitud de componentes, distribuyendo los sistemas de control y las aplicaciones en diferentes máquinas distribuidas a lo largo de la red y con capacidad de comunicarse entre ellas (servidores de datos y de alarmas, generadores de informes, de gráficas de tendencia, etc.).

El paso último ya entra en el campo de la seguridad y se aplica el principio de redundancia como parte de la posibilidad de ampliación en un sistema.

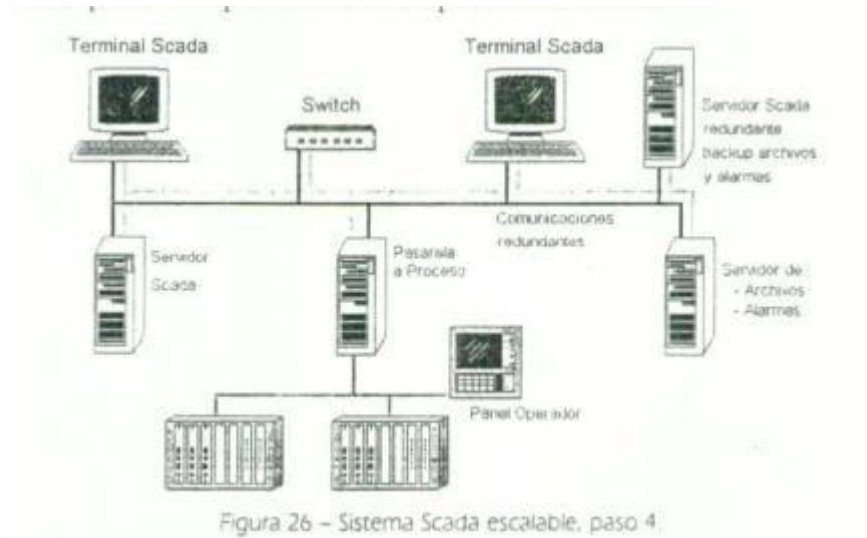


Figura 13.4 Sistema Scada escalable paso 4

En la figura podemos observar que la estructura inicial ahora dispone de servidores redundantes que proporcionan un sistema seguro y resistente a fallos:

- Si cae la pasarela a Proceso, el control de Campo sigue operativo gracias al Panel de Operador.
- El sistema de comunicaciones está duplicado. El Switch se ocupa de la gestión de la red corporativa.
- Los terminales Scada permiten el acceso al control de la instalación (Incluyendo el Panel de Operador).
- Los servidores redundantes toman el control en caso de problemas en los principales.

Para el usuario, estas estructuras y sus cambios son transparentes, las ve como un único sistema global de trabajo desde su ordenador.

Para el ingeniero encargado del control, se trata de una herramienta muy potente, pues permite aislar las tareas de control y gestionarlas de forma mucho más eficiente.

Por ejemplo, ampliar un sistema de control en una factoría, mediante la integración de nuevos servidores, no representará mayor problema que la adición de éstos y las

pruebas de funcionamiento pertinentes, como nodos nuevos de la red de comunicaciones. Aparecerá al usuario un aviso en su correo electrónico de que, a lo mejor, se cambia un nombre de acceso o una contraseña, pero se mantendrá el aspecto de su escritorio.

### Arquitectura de un sistema SCADA

El desarrollo del ordenador personal ha permitido su implantación en todos los campos del conocimiento y a todos los niveles imaginables. (Rodriguez, 2007)

Las primeras incursiones en el campo de la automatización localizaban todo el control en la PC y tendían progresivamente a la distribución del control en planta. De esta manera, el sistema queda dividido en tres bloques principales:

- Software de adquisición de datos y control (Scada).
- Sistemas de adquisición y mando (sensores y actuadores).
- Sistema de interconexión (comunicaciones).

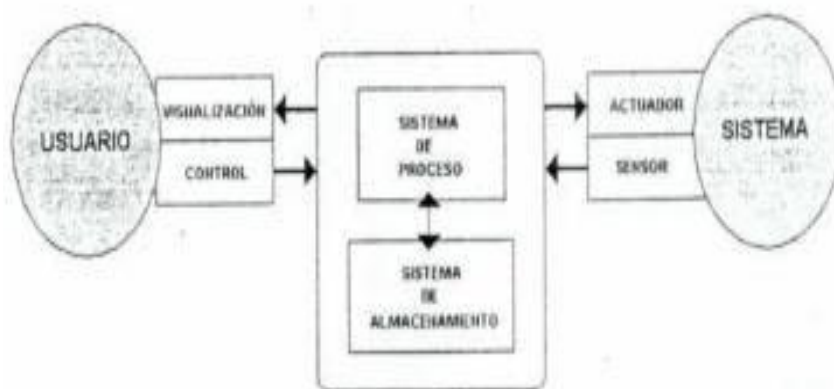


Figura 14.1 Estructura básica de un sistema de supervisión y mando

El usuario, mediante herramientas de visualización y control, tiene acceso al Sistema de Control de Proceso, generalmente un ordenador donde reside la aplicación de control y supervisión (se trata de un sistema servidor). La comunicación entre estos dos sistemas se suele realizar a través de redes de comunicaciones corporativas (Ethernet).

El Sistema de Proceso capta el estado del Sistema a través de los elementos sensores e informa al usuario a través de las herramientas HMI. Basándose en los comandos ejecutados por el Usuario, el Sistema de Proceso inicia las acciones pertinentes para mantener el control del Sistema a través de los elementos actuadores.

La transmisión de los datos entre el Sistema de Proceso y los elementos de campo (sensores y actuadores) se lleva a cabo mediante los denominados buses de campo. La tendencia actual es englobar los sistemas de comunicación en una base común, como Ethernet Industrial. Toda la información generada durante la ejecución de las tareas de supervisión y control se almacena para disponer de los datos a posteriori.

Un sistema Scada es una aplicación de software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción que proporciona comunicación entre los dispositivos de campo, llamados también RTU (Remote Terminal Units o Unidades Remotas), donde se pueden encontrar elementos tales como controladores autónomos o autómatas programables, y un centro de control o Unidad Central (MTU, Master Terminal Unit), donde se controla el proceso de forma automática desde la pantalla de uno o varios ordenadores.

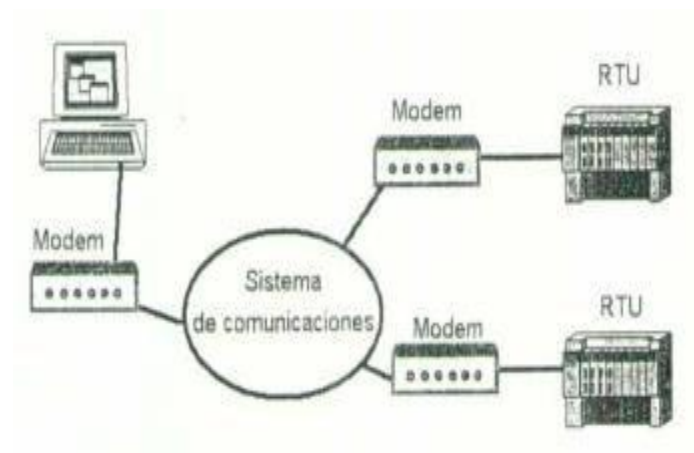


Figura 14.2 Idea básica de un sistema Scada

La estructura funcional de un sistema de visualización y adquisición de datos obedece generalmente a la estructura Maestro-Esclavo. La estación central (el maestro o *master*) se comunica con el resto de estaciones (esclavos o *aves*) requiriendo de éstas una serie de acciones o datos.

## Componentes en un sistema SCADA

### LA ESTACIÓN MAESTRA O MASTER

Recibe datos de las condiciones de los equipos en campo que es enviada por las estaciones remotas (RTU). Procesa la información y envía comandos a las estaciones remotas para mantener las variables de los procesos dentro de los parámetros establecidos.

La estación maestra dependiendo del tipo de sistema a Scada a implementar puede ser una PC con un software de supervisión y control. En muchos casos se opta por trabajar con un PLC con capacidad de comunicación que realizaría la tarea de leer la información de las unidades remotas.

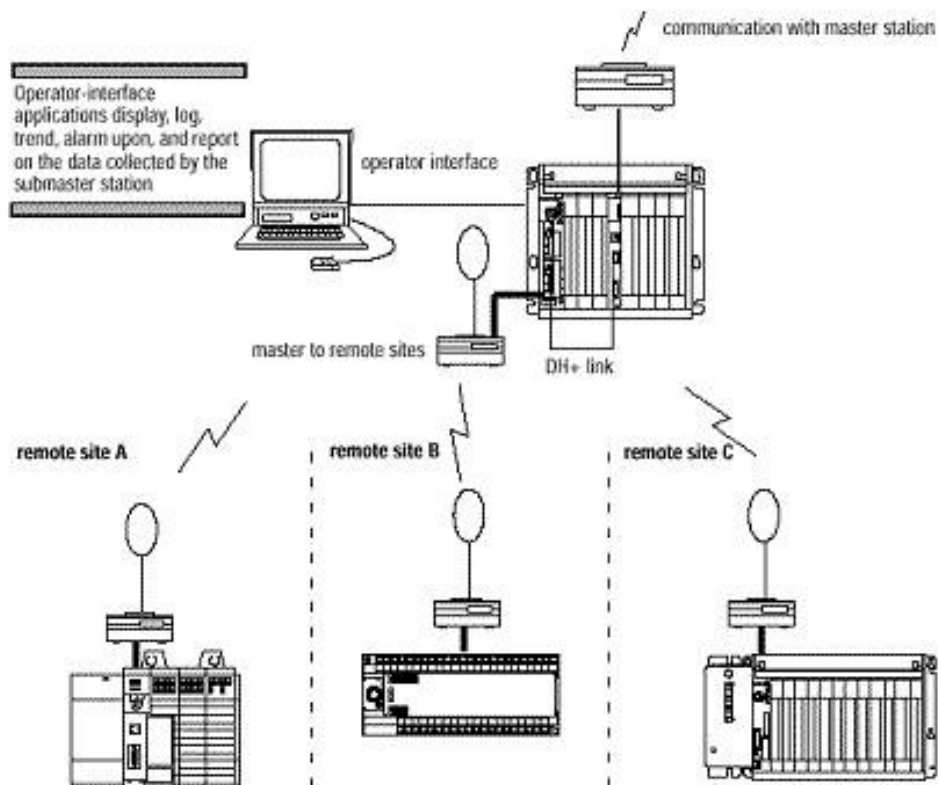


Figura 14.3 Estación Maestra o Master

## LAS UNIDADES REMOTAS O RTU

Controlan todas las señales de entrada y salida del campo como válvulas, equipos de medición, motores, etc. Monitorean las condiciones de los dispositivos de campo y almacenan los estados de las alarmas. Envían los estados y alarmas de los equipos en campo y reciben comandos de la estación maestra. (Rodriguez, 2007)

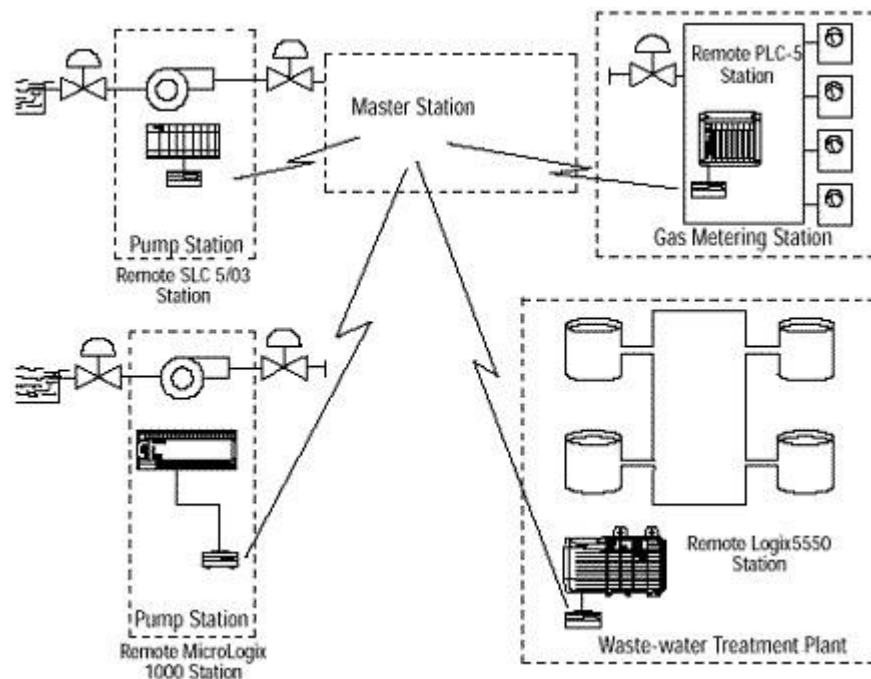


Figura 14.4 La estación maestra interroga a las RTU por medio de un proceso de encuesta o Polling

Algunos autores clasifican a las RTU en unidades tontas y unidades inteligentes. A los inicios de los sistemas Scada era común instalar unidades tontas que sólo se encargaban de enviar información a la estación maestra y esta estación tomaba la decisión y se la transmitía al RTU.

En la actualidad las RTU tontas han sido reemplazados por los RTU inteligentes que básicamente son pequeños PLC's que tienen capacidad de comunicaciones y se encargan de hacer un control de procesos en forma local y posteriormente la estación maestra se informa de la acción tomada por la RTU a fin de actualizar su registro de los datos.

Otros autores clasifican a las RTU dependiendo del número de señales de entrada salida que maneja cada equipo. Se considera a un RTU con menos de 100 señales de I/O como pequeñas, hasta 500 I/O como medianas y mayores a 500 I/O como grandes.

## RED DE TELEMETRÍA

Permite establecer el intercambio de información entre la estación maestra y las unidades remotas. Cuando hablamos de telemetría nos referimos básicamente a tres componentes:

- La topología usada: Corresponde al arreglo geométrico de los nodos. Entre los principales se tiene el punto a punto, punto a multipunto, etc.
- Modo de transmisión: Es la forma como viaja la información entre los distintos nodos de la red. Se puede tener dos modos principales: Full Duplex y Half Duplex.
- El medio utilizado: Corresponde al tipo de medio utilizado para enviar y recibir la información. Puede ser una línea física dedicada, a través del medio atmosférico, a través de las líneas de alta tensión, etc.

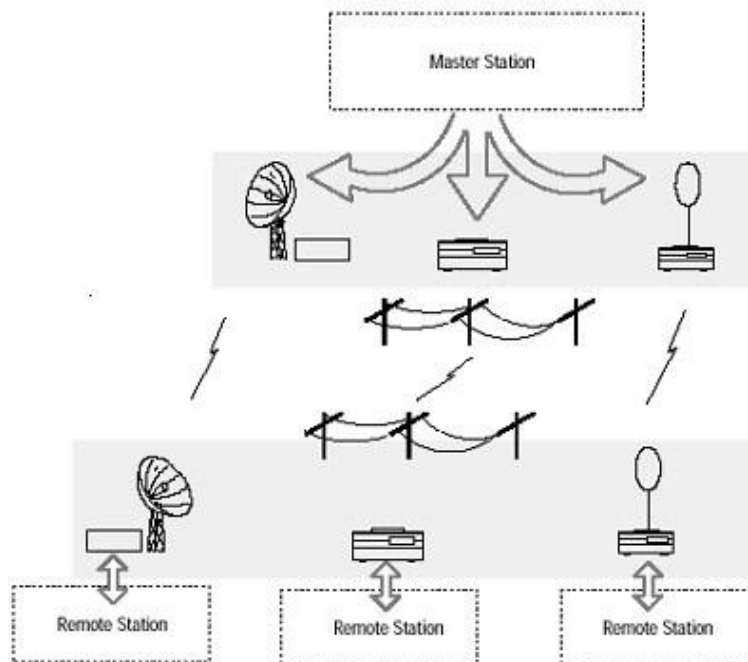


Figura 14.5 Red de Telemetría

## LA ESTACIÓN DE SUPERVISIÓN

Permite la visualización gráfica del estado del proceso, es decir proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso se representa mediante sinópticos almacenados en el ordenador de proceso y generados desde el editor incorporado en el SCADA o importados desde otra aplicación durante la configuración del paquete.

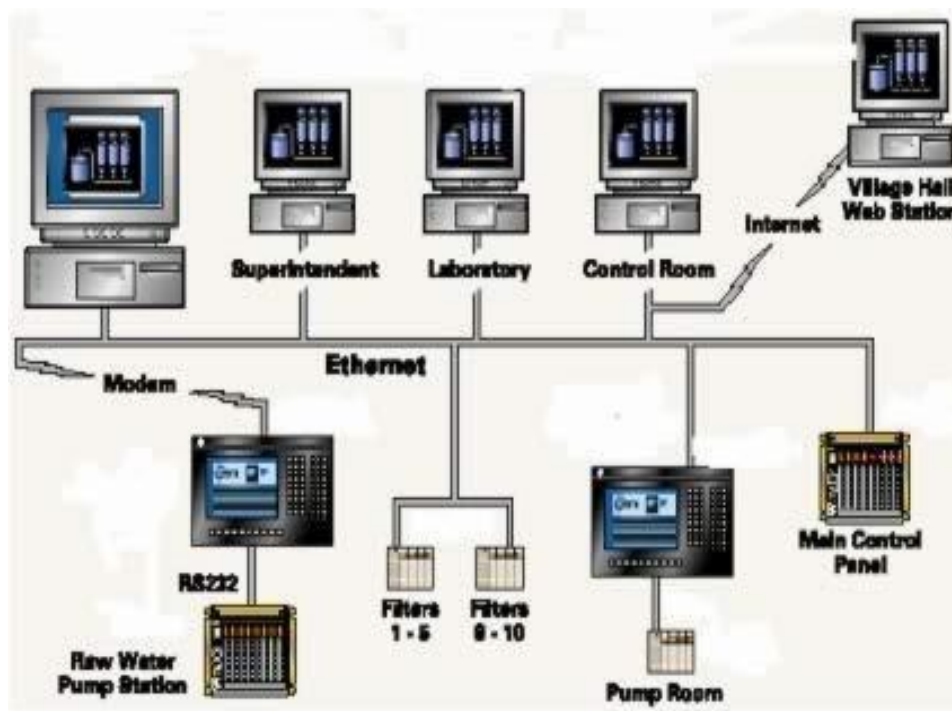


Figura 14.6 Estación de supervisión

## Redes de Comunicación Industrial

Las comunicaciones deben poseer unas características particulares para responder a las necesidades de intercomunicación en tiempo real. Además, deben resistir un ambiente hostil donde existe gran cantidad de ruido electromagnético y condiciones ambientales duras. En el uso de comunicaciones industriales se pueden separar dos áreas principales: una comunicación a nivel de campo, y una comunicación hacia el SCADA. En ambos casos la transmisión de datos se realiza en tiempo real o, por lo menos, con una demora que no es significativa respecto de los tiempos del proceso, pudiendo ser crítico para el nivel de



campo. Según el entorno donde van a ser instaladas, dentro de un ámbito industrial, existen varios tipos de redes:

### **Red de Factoría**

Para redes de oficina, contabilidad y administración, ventas, gestión de pedidos, almacén, etc. El volumen de información intercambiada es muy alto, y los tiempos de respuesta no son críticos.

### **Red de Planta**

Interconexión de módulos y células de fabricación entre sí y con departamentos como diseño o planificación. Suele emplearse para el enlace entre las funciones de ingeniería y planificación con las de control de producción en planta y secuenciamiento de operaciones.

### **Red de Célula**

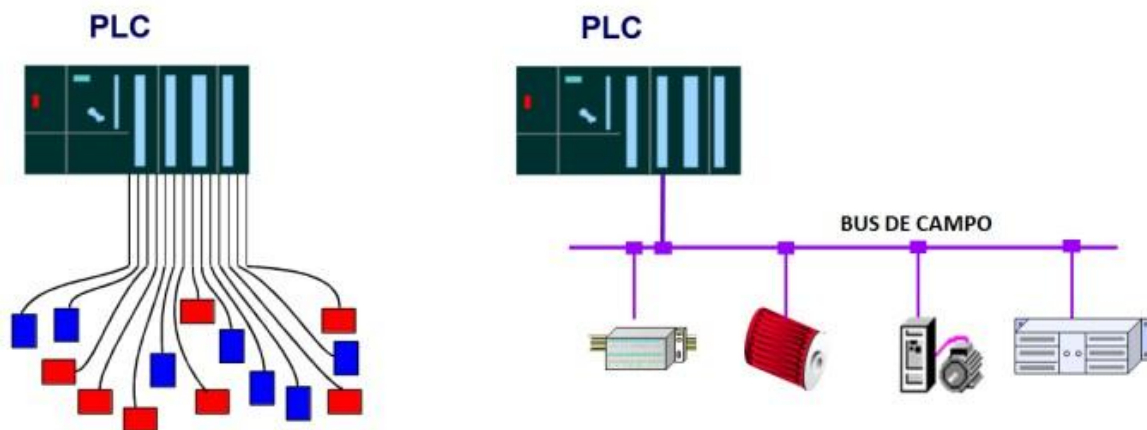
Interconexión de dispositivos de fabricación que operan en modo secuencial, como robots, máquinas de control numérico (CNC), autómatas programables (PLC), vehículos de guiado automático (AGV). Las características deseables en estas redes son: gestionar mensajes cortos eficientemente, capacidad de manejar tráfico de eventos discretos, mecanismos de control de error (detectar y corregir), posibilidad de transmitir mensajes prioritarios, bajo coste de instalación y de conexión por nodo, recuperación rápida ante eventos anormales en la red y alta fiabilidad.

### **Bus de Campo**

Un bus de campo es, en líneas generales, “un sistema de dispositivos de campo (sensores y actuadores) y dispositivos de control, que comparten un bus digital serie bidireccional para transmitir informaciones entre ellos, sustituyendo a la convencional transmisión analógica punto a punto”. Permiten sustituir el cableado entre sensores-actuadores y los correspondientes elementos de control. Este tipo de buses debe ser de bajo coste, de tiempos de respuesta mínimos, permitir la transmisión serie sobre un bus digital de datos con capacidad de interconectar controladores con todo tipo de dispositivos de entrada-salida, sencillos, y permitir controladores esclavos inteligentes.

## Panorámica de los Buses de Campo

Las señales de procesos industriales, originadas a pie de máquina, se transmiten normalmente con un extenso cableado punto a punto, incluso haciendo uso de transmisores “inteligentes”. Esto significa que cada sensor o actuador situado en campo se encuentra conectado a los módulos de entrada/salida de los PLCs, utilizando un par de hilos por instrumento. Cuando la distancia entre el instrumento y sistema de control comienza a ser considerable o cuando existen en el proceso un gran número de instrumentos, debemos tener en cuenta los costos de cableado, sobre todo cuando se establece la necesidad de un número extenso de conductores de reserva, de cara a futuras ampliaciones. Por estas razones, en la actualidad se está implantando definitivamente la filosofía de bus de campo. Con este sistema es posible la sustitución de grandes haces de conductores por un simple cable bifilar o fibra óptica, común para todos los sensores y actuadores, con el consiguiente ahorro económico que ello supone. La comunicación de la variable de proceso será totalmente digital.



Sistema de cableado convencional versus Bus de Campo

Figura 14.7 Sistema de cableado convencional versus bus de campo

Inicialmente, los buses de campo están muy poco normalizados, por lo que existe una gran variedad de ellos con diferentes características dependiendo de a qué aplicaciones estén destinados. Lo cierto es que actualmente cabe afirmar que los buses de campo están llegando a un período de madurez, planteándose la convivencia de un número reducido de estándares con posibles soluciones de comunicación entre ellos.

## Protocolos de comunicación.

Los protocolos de comunicación son un grupo de reglas que permiten la comunicación entre los diferentes dispositivos que conforman una red.

### Protocolo DeviceNet.



Este protocolo sirve para conectar módulos de entrada/salida, HMI, instrumentación, entre otros.

La topología de esta red, es del tipo bus. Tiene un alcance que varía en función de la distancia entre dos dispositivos, también por la configuración del cable, variando si es del tipo plano, redondo grueso o redondo delgado y de la velocidad de transmisión de datos. Ofrece control descentralizado, conexión a equipos de diferentes fabricantes. Funciona en modo Maestro/Esclavo donde un controlador principal (maestro) recibe toda la información de un dispositivo secundario (esclavo) o también de modo punto a punto donde se intercambian información entre los dispositivos de control conectados a la red.

Provee beneficios tales como, reemplazar en “caliente” algún dispositivo conectado a la red, sin tener que hacer parada de planta, brindando así gran flexibilidad al usuario. Es eficiente a nivel de comunicaciones al proporcionar procesamiento de datos a alta velocidad. Chequeo de errores, el cual ayuda a tomar acciones preventivas para soluciones de problemas.

### Protocolo ControlNet.



Es un protocolo de red abierto de alta velocidad que se utiliza para transferir información de tiempo crítico. Proporciona los servicios de control y transmisión de mensajes en tiempo real para la comunicación entre dispositivos similares.

Esta red abierta proporciona el rendimiento necesario para el control de datos críticos, tales como las actualizaciones de entradas/salidas y el enclavamiento entre controladores. La red ControlNet también posibilita las transferencias de datos no críticos, tales como la carga y la descarga de programas y la transmisión de mensajes.

Soporta un máximo de 99 nodos, sin un mínimo de distancia entre ellos. Ofrece opciones de medios para satisfacer diferentes necesidades de aplicación, tales como: cobre, fibra, anillo de fibra, redundancia en los medios de comunicación, entre otras.



#### **Protocolo ModBus.**

Es el protocolo de comunicaciones más empleado y fácil de implementar a nivel industrial, debido a que es de uso público, fácil y maneja bloque de datos sin tantas restricciones. Su estructura lógica es del tipo Maestro/Esclavo, la velocidad de comunicaciones varía entre 75 bps y 19.200 bps (bit por segundo). La máxima distancia entre estaciones depende del nivel físico, pudiendo alcanzar máximo 1200 m repetidores. Permite hasta 63 esclavos más una estación maestra.

La comunicación maestro/esclavo se puede dar de dos tipos:

- Del tipo punto a punto, donde el maestro envía una demanda al esclavo y éste a su vez envía una respuesta al maestro.
- Mensajes difundidos, donde el maestro envía una comunicación unidireccional a todos sus esclavos. Se usa para enviar datos comunes de configuración.

La codificación de los datos se hace de dos formas:

- ModBus ASCII.
- ModBus RTU (Modo Binario)

Una variante de este protocolo, es el protocolo ModBus TCP/IP el cual brinda flexibilidad al usuario al poder acceder al controlador de un sistema por vía internet realizando así reparaciones o mantenimiento remoto, sin tener que desplazarse hasta la planta ahorrando costos y tiempo. A su vez, este protocolo se ajusta a la naturaleza Maestro/Esclavo de ModBus, permitiendo así las ventajas anteriores más las nuevas que ofrece este protocolo.



#### **Protocolo EtherNet/IP.**

Protocolo industrial (IP por sus siglas en inglés), EtherNet/IP es un protocolo que aprovecha los medios físicos de EtherNet, protocolo de control de transmisión (TCP por sus siglas en inglés), protocolo Internet (IP por sus siglas en inglés) y protocolo industrial común (CIP). Al fusionar estas tecnologías se obtiene un protocolo capaz de enlazar dispositivos de ambiente industrial con la red central de una empresa. Admite la transmisión de mensajería implícita (mensajes en tiempo real de módulos de I/O), como también el intercambio de mensajería sin tiempos críticos.

### **Controladores lógicos programables (PLC)**

El PLC es un dispositivo electrónico que puede ser programado por el usuario y se utiliza en la industria para resolver problemas de secuencias en la maquinaria o procesos, ahorrando costos en mantenimiento y aumentando la confiabilidad de los equipos. Es importante conocer sus generalidades y lo que un PLC puede hacer por tu proceso, pues podrías estar gastando mucho dinero en mantenimiento y reparaciones, cuando estos equipos te solucionan el problema y se pagan solos.



Figura 15.1 Controladores lógicos programables

La palabra PLC es el acrónimo de Controlador Lógico Programable (en inglés Programmable Logic Controller).

### **Estructura de un PLC**

Un controlador lógico programable está constituido por un conjunto de módulos o tarjetas (circuitos impresos), en los cuales están ubicados los componentes electrónicos que permiten su funcionamiento. Cada una de las tarjetas cumple una función específica. Algunos PLC tienen una cubierta o carcasa, llamada comúnmente "rack", que viene a ser

un bastidor donde se alojan las tarjetas en forma ordenada, que por lo general están comunicadas.

El controlador programable tiene una estructura muy semejante a los sistemas de programación, como el computador, cuya estructura física (hardware) está constituido por:

- Fuente de alimentación.
- Unidad de procesamiento central (CPU).
- Módulos o interfaces de entrada/salida (E/S).
- Módulos de memoria.
- Unidad de programación.

En algunos casos cuando el trabajo que debe realizar el controlador es más exigente, se incluyen:

### **Módulos inteligentes.**

En la figura siguiente se muestra el diagrama de bloques de un automatismo gobernado por PLC, y a continuación se describe, con mayor detalle, cada una de las partes del controlador programable.

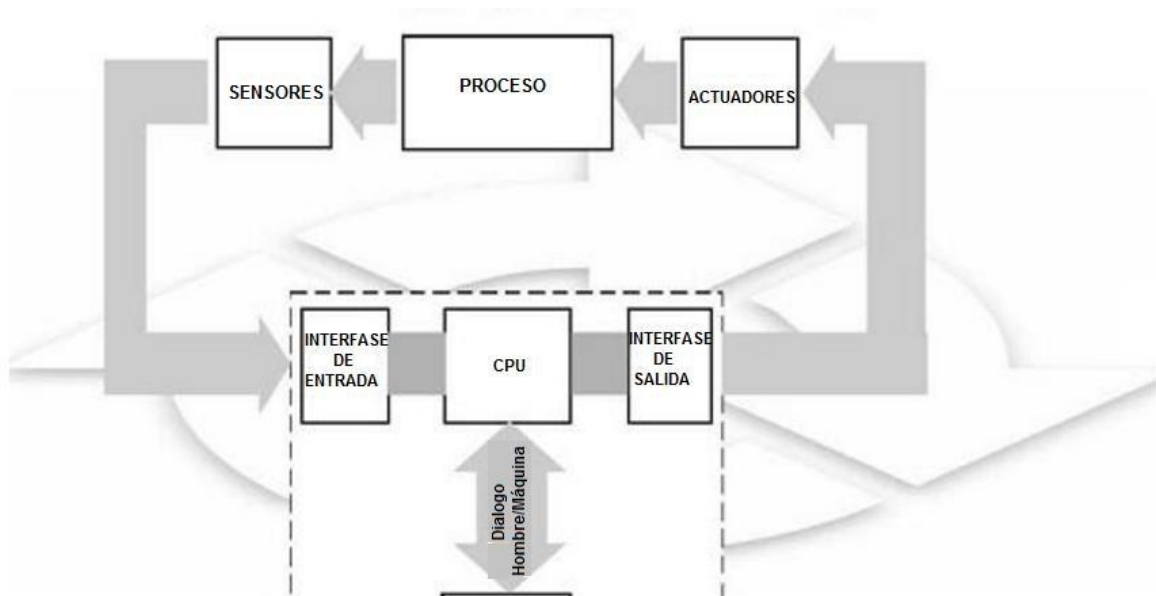


Figura 15.2 Diagrama de bloques de un PLC gobernando un proceso

## FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La función de la fuente de alimentación en un controlador, es suministrar la energía eléctrica a la CPU y demás tarjetas según la configuración del PLC.

En los circuitos interiores de una fuente de alimentación se transforma la tensión alterna de la red a tensión continua, en niveles que garanticen el funcionamiento del hardware del PLC.

A la fuente de alimentación también se le conoce como la fuente de poder: Power Supply.



Figura 15.3 Fuente de alimentación PLC Allen Bradley, MicroLogix 1500

Todas las fuentes están protegidas contra cortocircuitos mediante fusibles, que muy fácilmente pueden ser reemplazados en caso de una avería.

## UNIDAD DE PROCESAMIENTO CENTRAL (C.P.U.)

Es la parte más compleja e imprescindible del controlador programable, en otros términos, podría considerarse el cerebro del controlador.

La unidad central está diseñada en base a microprocesadores y memorias. Las memorias son del tipo ROM y RAM.

La memoria ROM (Read Only Memory): es una memoria de lectura, que permanece fija en el CPU, contiene el sistema operativo con que opera el controlador, NO SE BORRA.

La memoria RAM (Random Access Memory): memoria de acceso aleatorio, es una memoria volátil y fácil de modificarla.

En la memoria RAM se ubican:

- La memoria del usuario.
- Los temporizadores.
- Los contadores.
- Los bits o memorias internas.
- Base de datos.



Figura 15.4 Unidad de procesamiento central: Allen Bradley 1769-L32E CompactLogix

La CPU al igual que para las computadoras, se pueden clasificar de acuerdo a la capacidad de su memoria y las funciones que puedan realizar, además de su velocidad de procesamiento. El tiempo de lectura del programa está en función del número y tipo de instrucciones, y por lo general es del orden de los milisegundos. Este tiempo tan pequeño significa, que cualquier modificación de estado en una entrada, modifica casi instantáneamente el estado de una señal de salida.



## MODULOS O INTERFASES DE ENTRADA Y SALIDA (E/S)

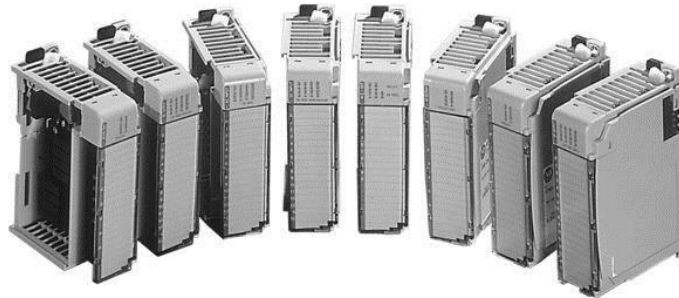


Figura 15.5 Módulos de entradas y salidas: ALLEN BRADLEY 1769 COMPACT I/O

Son los que proporciona el vínculo entre la CPU del controlador y los dispositivos de campo del sistema. A través de ellos se origina el intercambio de información ya sea para la adquisición de datos o la del mando para el control de máquinas del proceso.

### Tipos de módulos de entrada y salida

Debido a que existen gran variedad de dispositivos exteriores (captadores, actuadores), encontramos diferentes tipos de módulos de entrada y salidas, cada uno de los cuales sirve para manejar cierto tipo de señal (discreta o analógica) a determinado valor de tensión o de corriente en DC o AC.

- **Módulos de entradas discretas:** La entrada que se introduce sólo tiene 2 valores posibles, ACTIVADO-DESACTIVADO (0 ó 1). Utilizaremos entradas de este tipo para conectar pulsadores, selectores, finales de carrera, detectores fotoeléctricos,
- **Módulos de salidas discretas:** Solo admiten dos estados posibles ACTIVADO-DESACTIVADO (0 o 1). Utilizan salidas de este tipo las que se conectan a relés, contactores, lámparas de señalización entre otras.
- **Módulos de entrada analógica:** En este caso la entrada recibe un valor continuo de tensión o intensidad, dentro del rango admite la entrada (normalmente de 4-20 mA o de 0 – 10 V). Conectaremos a estas entradas sensores analógicos (nos miden valores continuos), como las sondas de presión, temperatura, caudalímetros...

- **Módulos de salida analógica:** Admiten valores dentro de un rango continuo de valores posibles. Son salidas analógicas variadores de velocidad, válvulas de control de flujo, actuadores lineales, resistencias variables

## Capítulo 3

### Generalidades

#### 3.1 Planta de nivel, presión y caudal.

La planta que utilizaremos para la realización de este proyecto de tesis es una planta diseñada con fines experimentales. El diseño de la planta se muestra en la siguiente figura.

El diseño cuenta con una parte externa y una parte interna:



Figura 16.1.1 Planta de nivel, presión y caudal



Figura 16.1.2 Tubería metálica de 1\2 pulgada



Figura 16.1.3 Cilindro metálico de 60 cm de alto con un radio de 30 cm



Figura 16.1.4 tanque rectangular de 40cmx1.2mx45cm

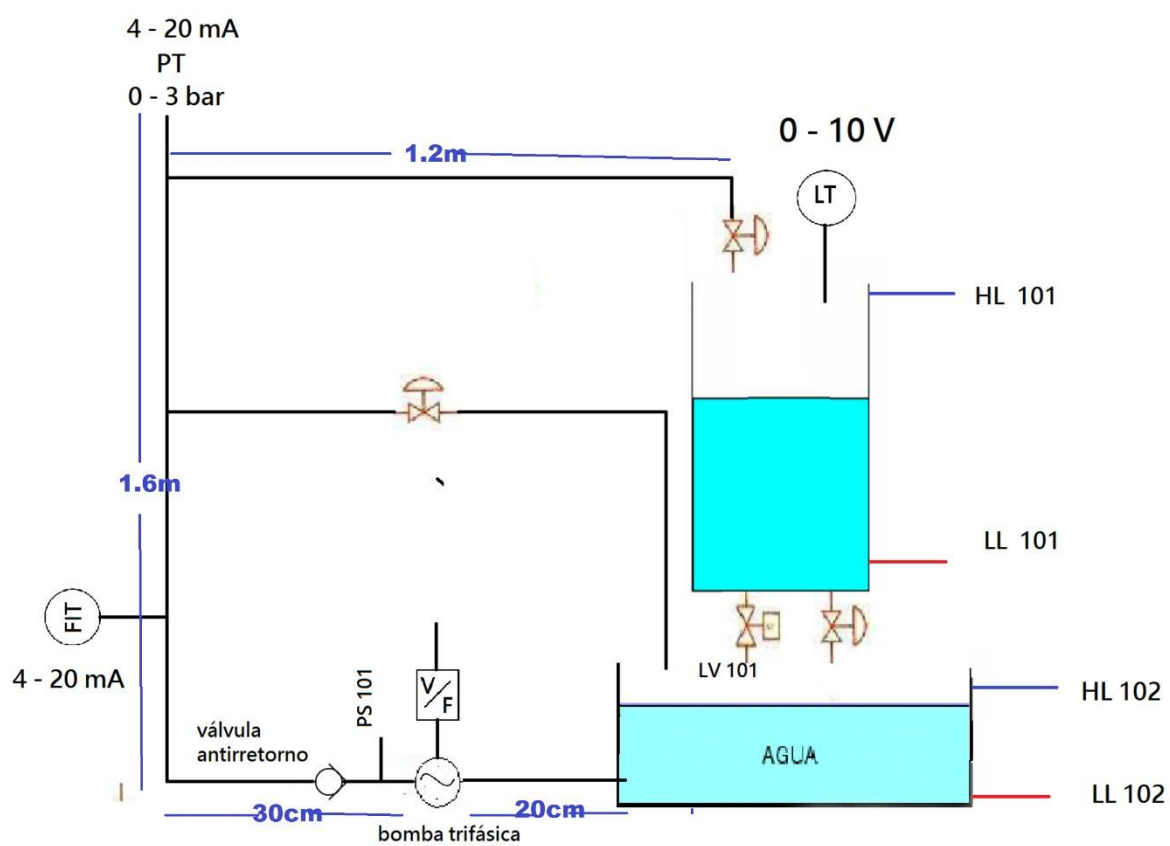


Figura 16.1.5 Medidas de tuberías.

### 3.1.1 Parte externa

- **Transmisor indicador de flujo.**

Marca arkon, de la gama Mag X2. Es un flujometro electromagnético, funciona con una alimentación de 12VDC/24VDC/90-250VAC; además cuenta con una precisión de  $\pm 2.0\%$  del valor medido, también incluye un sensor de temperatura para medir la temperatura del líquido.

Cuenta con varios protocolos de comunicación así como: Modbus RTU, RS232, USB, BLUETOOTH entre otros. Señal de corriente de 4 – 20 mA. Sobre la pantalla LCD se puede decir que es de 128x64 px y 6 botones táctiles.



Figura 16.1 Transmisor indicador de flujo

- **Transmisor de presión.**

Marca WIKA, de la gama S-11. Es un transmisor con medida de 0 – 0.25 Bar con una señal de corriente de 4mA – 20Ma, soporta temperaturas elevadas de hasta 150°C, tiene una exactitud de medición elevada, una estructura robusta, un acabado de alta calidad y una gran flexibilidad en su configuración caracterizan el modelo S-11.



Figura 16.2 Transmisor de presión

- **Transmisor de nivel.**

Marca ARDUINO, de la gama UNO. El Arduino Uno es un tablero de microcontroladores basado en el ATmega328.

Tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, una toma de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio. Además, se utilizará El HC-SR04 sensor de distancias por ultrasonidos capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra en un rango de 2 a 450 cm.



Figura 16.3 Transmisor de nivel

- **Válvula ON/OFF.**

Marca burket, de la gama 6213ev. Es una válvula solenoide adecuado para uso en líquidos, se alimenta con 24vDC. En combinación con un enchufe según DIN EN 17301-803 Forma A, las válvulas cumplen la clase de protección IP65 - en combinación con una carcasa de acero inoxidable NEMA 4X.



Figura 16.4 Válvula On-Off

- **Bomba centrífuga.**

Marca Pentax, de la gama U5. bombas centrífugas multietapas horizontales. Bombeo de líquidos químicamente y mecánicamente no agresivos; sistemas de presurización; riegos; agua potable o con glycol; tratamientos del agua; industria alimenticia; calefacción y refrigeración; sistemas de lavado. Altura de aspiración manométrica: hasta 7 m . Presión máxima bomba: 8.5 bar. Temperatura del líquido: de -15 °C hasta +110 °C.



Figura 16.5 Bomba centrífuga

### 3.1.2 Parte interna

- **Variador de frecuencia.**

Marca SCHNEIDER. De la gama Altivar 12. El variador Altivar 12 es un convertidor de frecuencia para motores asíncronos trifásicos de 200...240 V de potencias comprendida entre 0,18 kW y 4 kW.



La sencilla instalación de Altivar 12, basada en el principio "plug&play", su tamaño compacto, sus funciones integradas y su versión sin disipador lo hacen especialmente adecuado

Para aplicaciones que impliquen el uso de máquinas Industriales simples y ciertas máquinas de consumidor.



Figura 16.6 Variador de frecuencia

- **Controlador lógico programable Central.**

Marca Allen Bradley. De la gama Compactlogix I32e. El controlador CompactLogix 1769 ofrece control, comunicación y elementos de E/S avanzados en un paquete de control distribuido. Software de programación RSLogixn5000 Puertos incorporados de comunicación para redes EtherNet/IP Un módulo de interface de comunicación 1769-SDN proporciona control de E/S y la configuración remota de los dispositivos a través de DeviceNet Un puerto serial incorporado en cada controlador CompactLogix Módulos Compact I/O que proporcionan un sistema de E/S compacto, montado en panel o riel DIN.



Figura 16.7 Controlador Lógico Programable Central

- **Controlador lógico programable Secundario.**

Nuestros sistemas de controlador lógico programable MicroLogix™ 1400 Boletín 1766 se basan en características fundamentales de MicroLogix 1100: EtherNet/IP™, edición en línea y un panel LCD incorporado. Estos controladores ofrecen mayor conteo de E/S, contador de alta velocidad más rápido, salida de tren de impulsos, capacidades de red con características mejoradas y luz de retroiluminación en el panel LCD. Los controladores sin puntos de E/S analógicas incorporados proporcionan 32 puntos de E/S digitales, mientras que las versiones analógicas ofrecen 32 puntos de E/S digitales y 6 puntos de E/S analógicas. Puede ampliar todas las versiones con hasta siete módulos de expansión de E/S 1762.



Figura 16.7 Controlador Lógico Programable Secundario

## 3.2. Software de Programación

### 3.2.1 Introducción

Para la realización de este proyecto de tesis utilizaremos los software de programación de la familia rockwel automation de allen bradley como son: Rslinx, RSlogix 500, RSlogix 5000 y facktory talk. A continuación de describirá cada uno de ellos.

## **RSlinx**

Es el software que nos permite supervisar y configurar las redes de comunicación industrial entre dispositivos de Rockwell Automation y puede utilizarse en los siguientes sistemas operativos.

- Microsoft Windows XP, XP SP1 Ó SP2
- Microsoft Windows Server 2003 SP1 o R2
- Microsoft Windows 2000 SP4
- Microsoft Windows Vista Business (32 bits) y vista home basic (32 bits)
- Microsoft Windows 7

Este software nos permite trabajar sobre las comunicaciones PC – PLC o sobre las comunicaciones entre los dispositivos conectados al backplane del autómatas mediante el bus de campo.



Figura 17.1 Ventana principal de RSlinx Classic

## **Pasos para establecer la comunicación con el PLC**

1. Click en configure drivers.

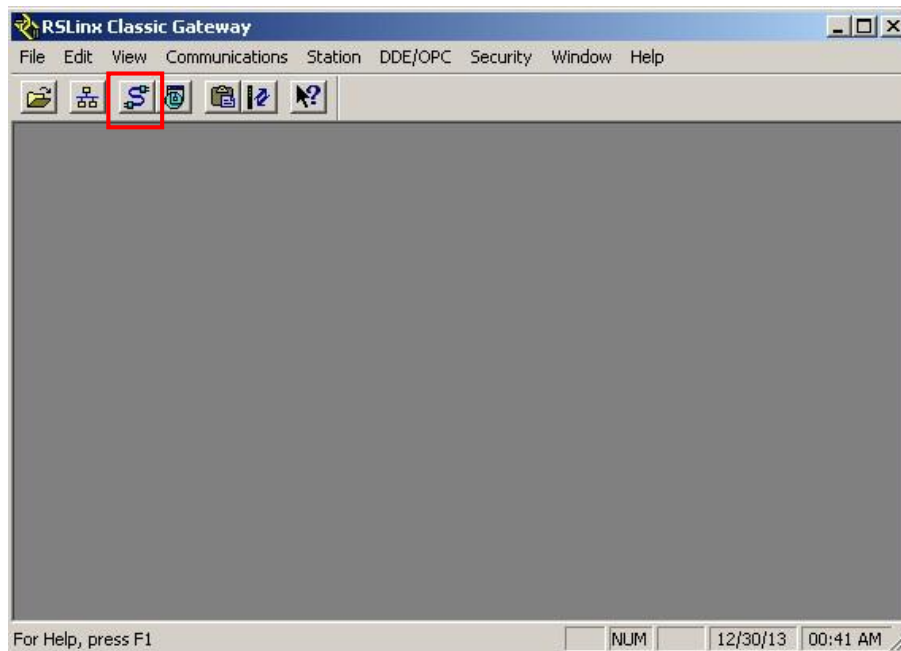


Figura 17.2 Pasos para establecer la comunicación con el PLC

2. En la lista desplegable escogeremos el driver para el tipo de comunicación que necesitamos.

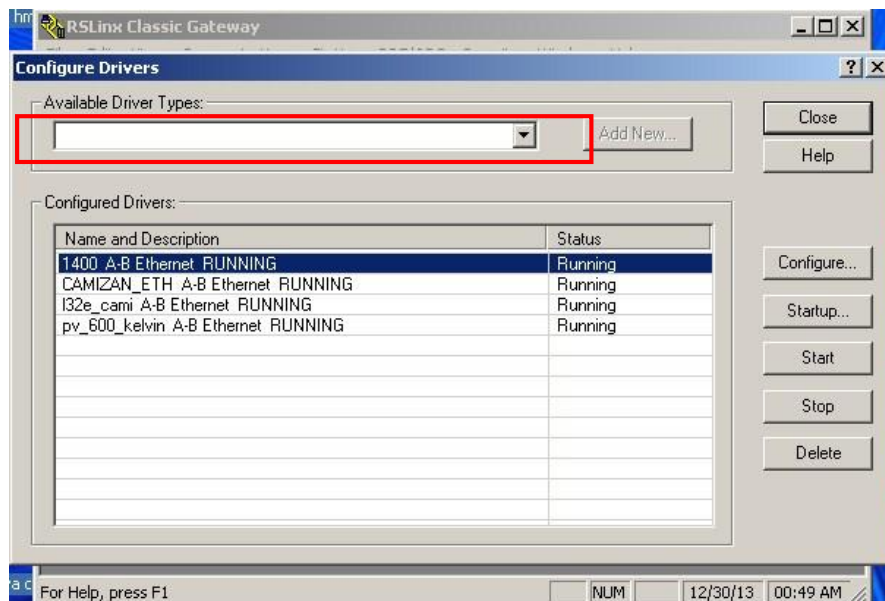


Figura 17.3 Lista desplegable

3. En nuestro caso escogeremos Ethernet devices.

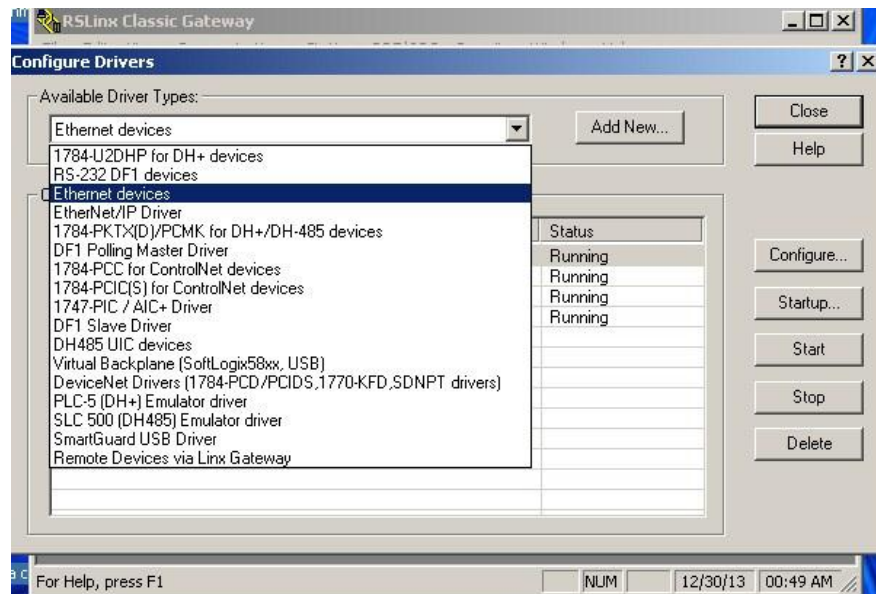


Figura 17.4 Escogiendo el driver ethernet devices

4. Click en Add New y posteriormente pondremos el nombre que deseemos.

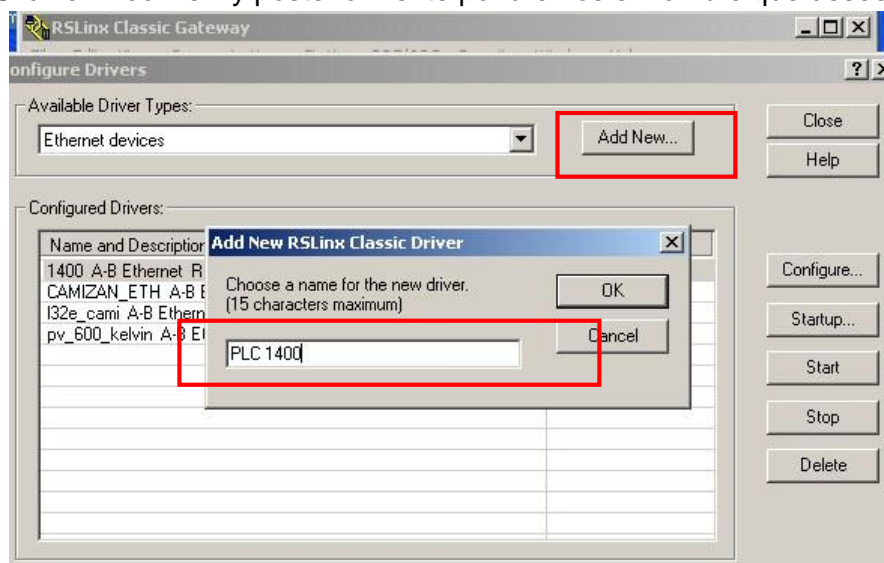


Figura 17.5 Haciendo click en Add new

5. En la ventana que se nos abrirá a continuación colocaremos la dirección IP del plc con el cuál se establecerá la comunicación.

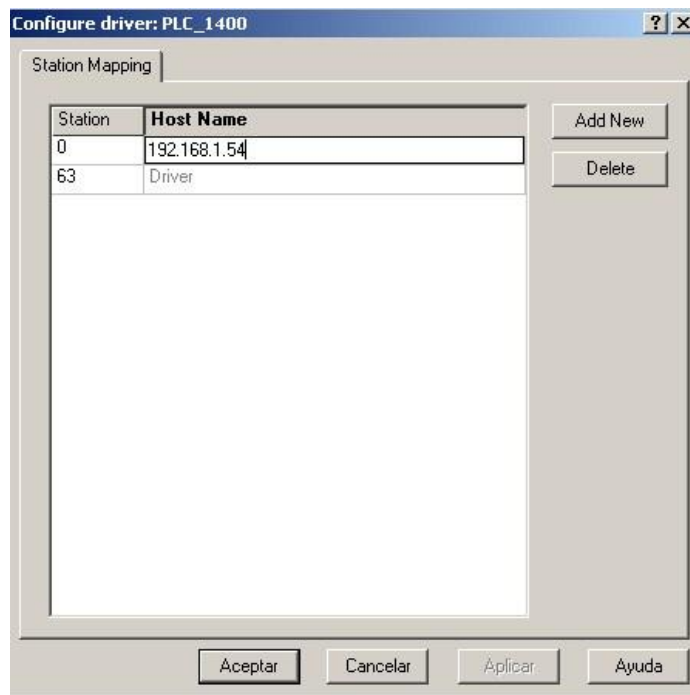


Figura 17.6 Colocando la dirección IP del PLC

6. Comprobaremos que se estableció el driver.

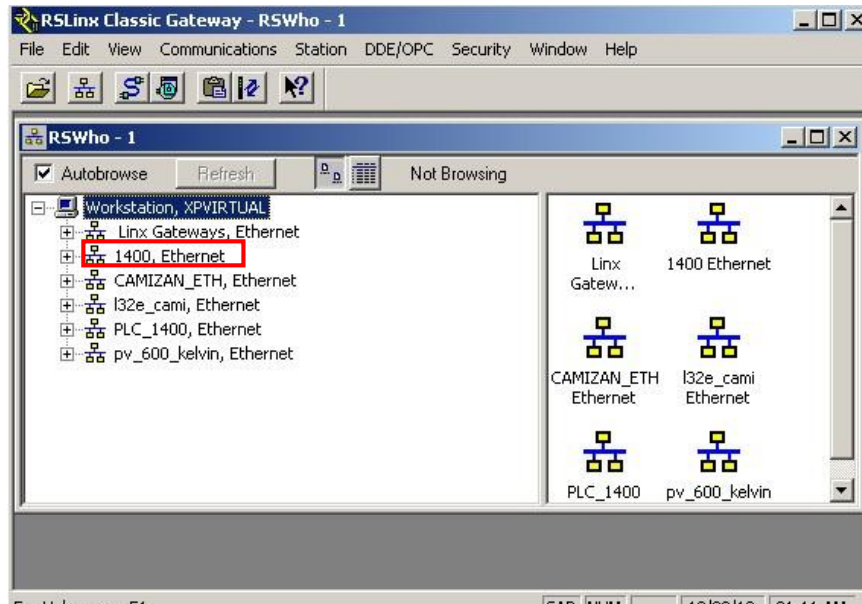


Figura 17.7 Comprobando que se estableció el driver

**RSlogix 500**

El RSLogix 500 es el software que nos permite programar y configurar el funcionamiento de un autómata de la familia micrologix y los SLC 500. Para el buen funcionamiento de dicho software se debe cargar al proyecto los diferentes módulos de dicho PLC; ya sea embebidos o módulos de expansión (entradas y salidas digitales y/o analógicas).

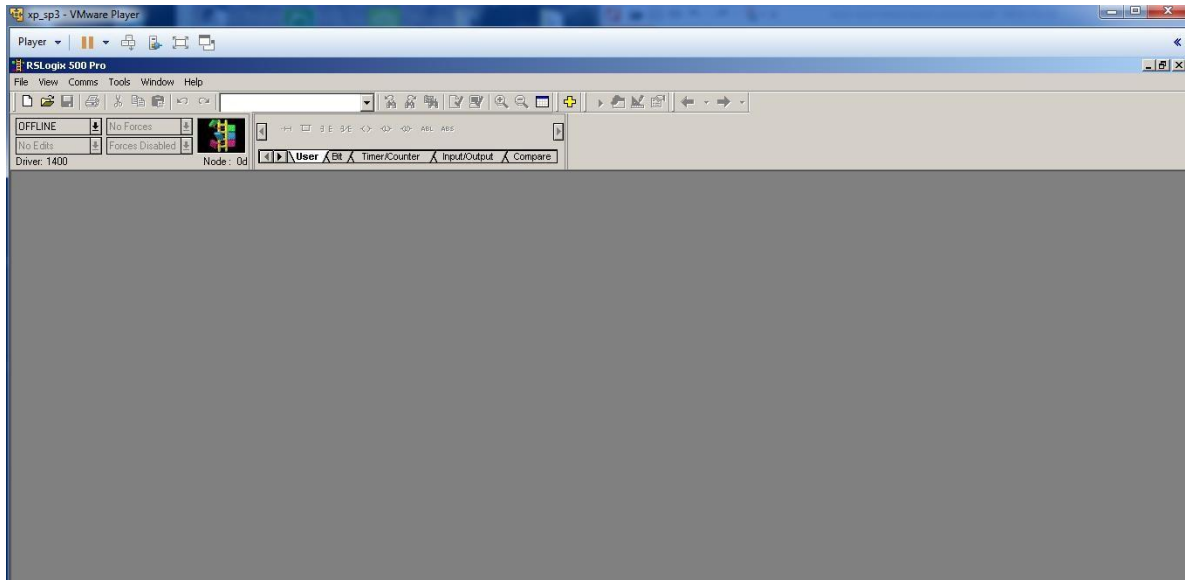


Figura 18.1 Ventana principal de RSlogix 500

1. Click en New.

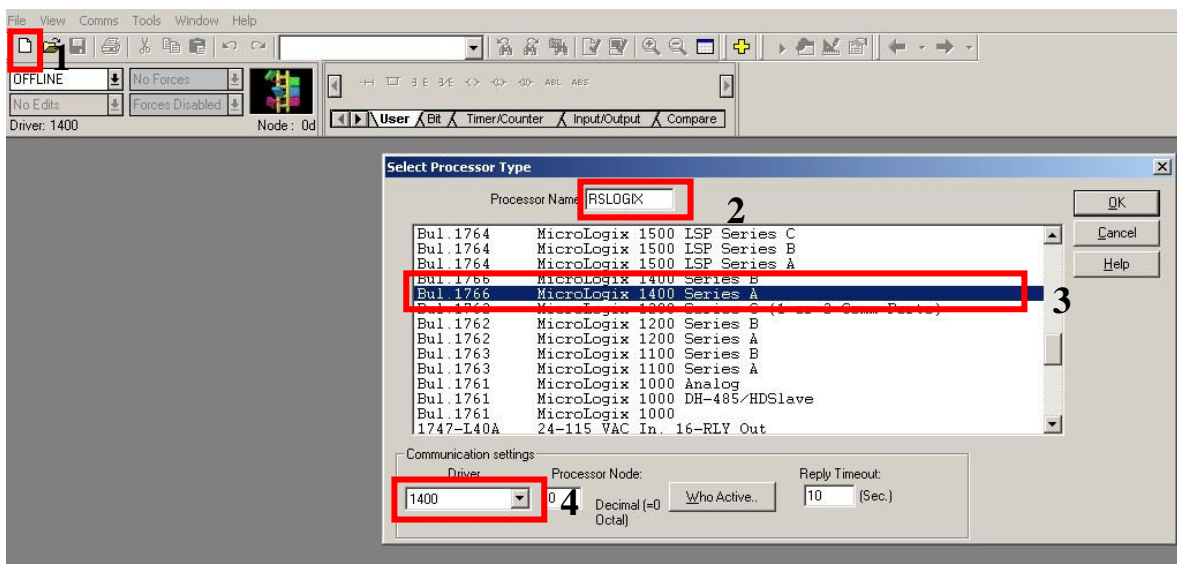


Figura 18.2 Haciendo click en new

2. Click en New.

3. En procesor name se coloca el nombre.



4. Se elige la serie de PLC que se va a utilizar (Micrologix 1400 series A para nuestro caso)
5. Se elige el driver que se creó con anterioridad en el RSlinx.

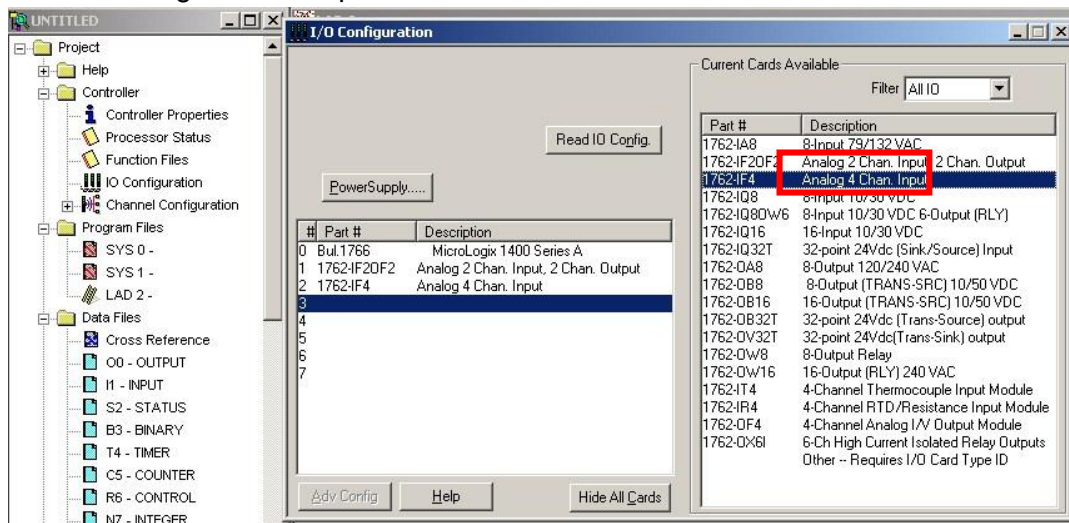


Figura 18.3 Eligiendo el driver que se creó con anterioridad en RSlinx

En IO configuration se carga los módulos de entradas y salidas (digitales y/o analógicas)

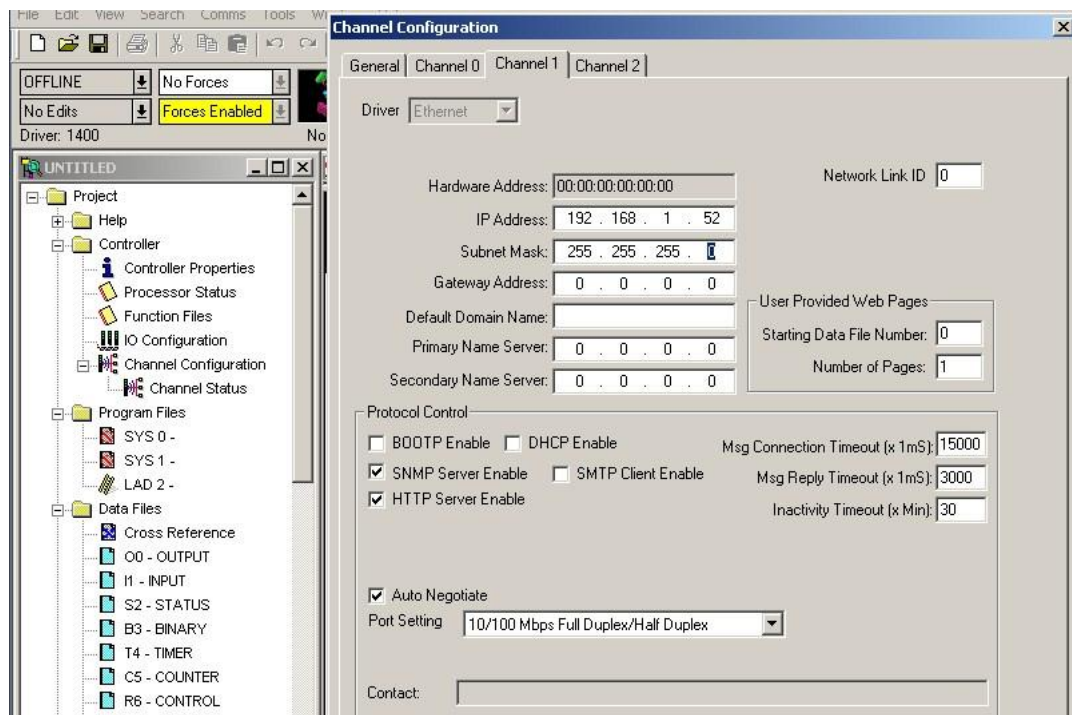


Figura 18.4 Carga de los módulos de entradas y salidas

En channel configuration se coloca el IP, y máscara del PLC con el que se trabajará



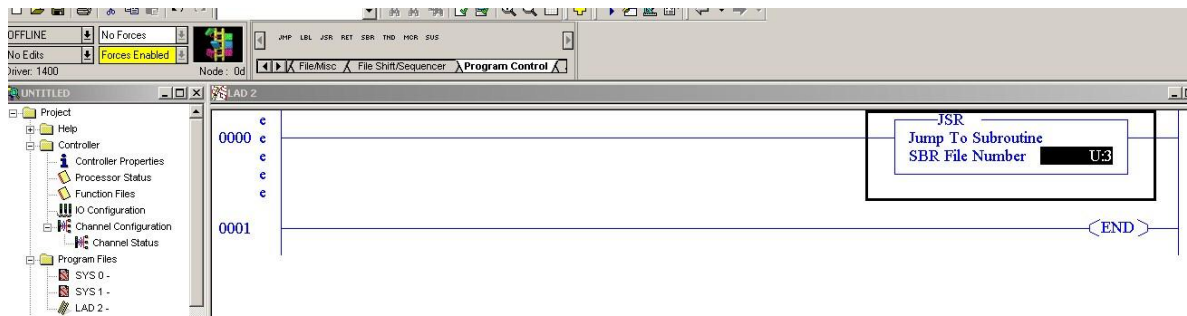


Figura 18.5 Instrucción JSR

En LAD 2(rutina principal) se llama la instrucción JSR que es la que llama a la subrutina U:3(LAD 3) en la cual se realizará la programación.

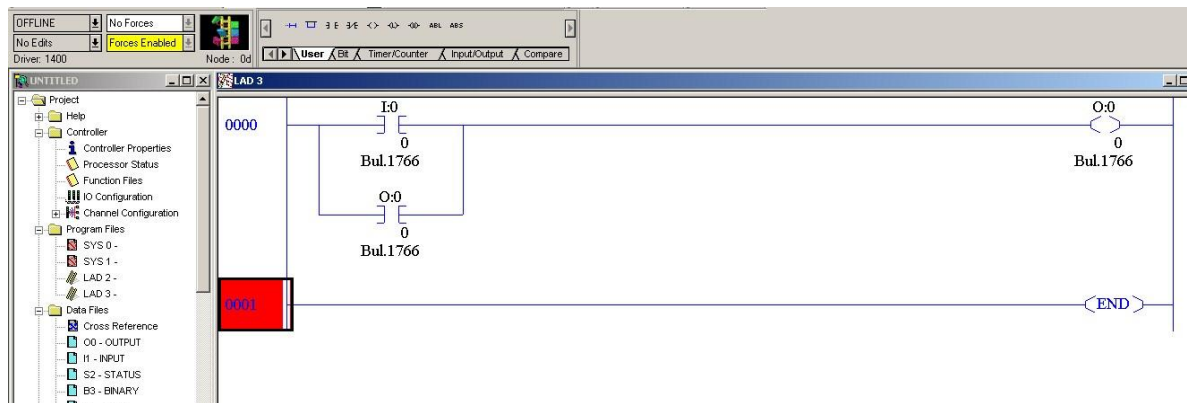


Figura 18.6 Creación de la programación (en LADDER)

En LAD 3 se creará la programación (en LADDER) para ser ejecutada en el autómatas.  
Ejemplo: enclavamiento simple.

## RSlogix 5000

El RSLogix 5000 es el software que nos permite programar y configurar el funcionamiento de un autómatas de la familia COMPACT LOGIX Y CONTROL LOGIX. Para el buen funcionamiento de dicho software se debe cargar al proyecto los diferentes módulos de dicho PLC; ya sea embebidos o módulos de expansión (entradas y salidas digitales y/o analógicas).

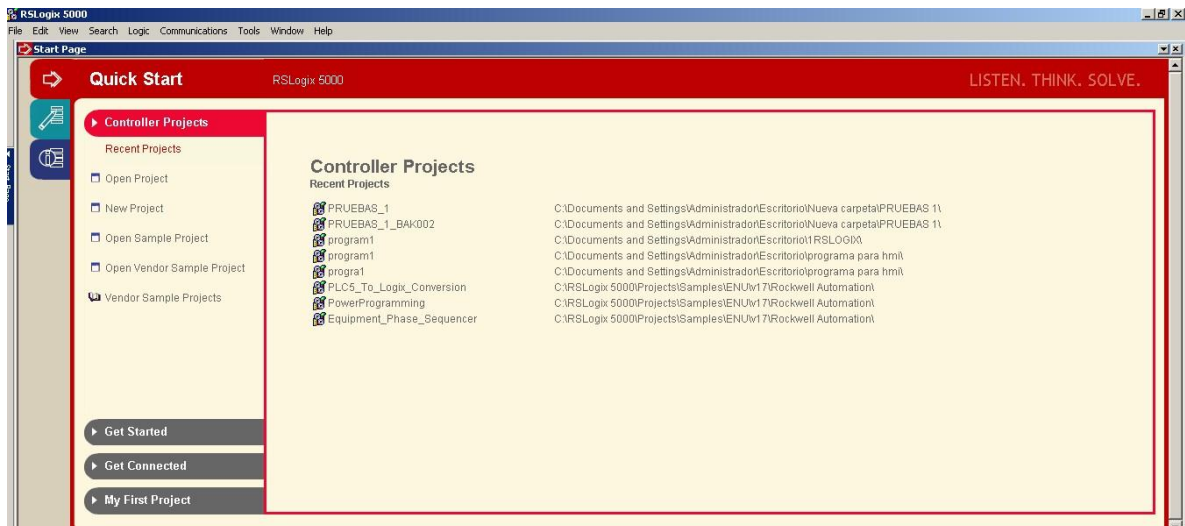


Figura 19.1 Ventana principal de software RSLogix 5000

Para crear un nuevo proyecto hacemos click en File, luego en New

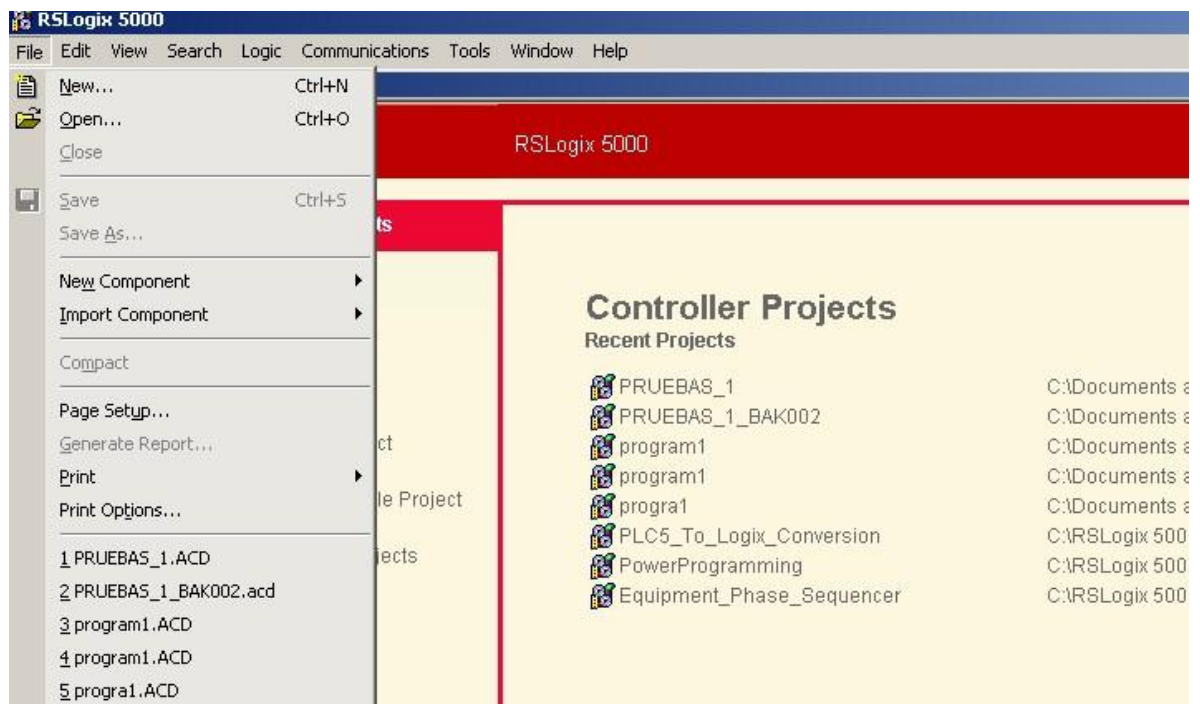


Figura 19.2 Creación de un nuevo proyecto

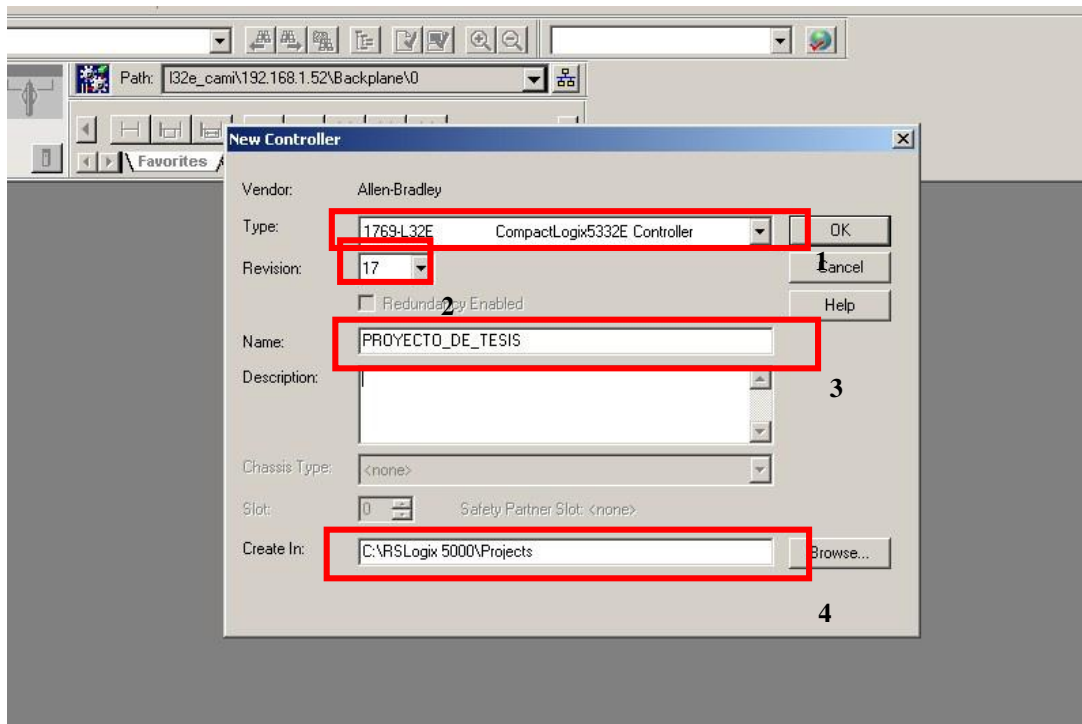


Figura 19.3 Elección del controlador del PLC en la lista desplegable

1. Se escoge en la lista desplegable el controlador del PLC a programar (Para nuestro proyecto de tesis será el Compact Logix L32E) 2. El numero revisión o firewall será el mismo del PLC a usar.
3. Colocaremos en el nombre de preferencia.
4. Lo guardaremos en la ruta de preferencia.

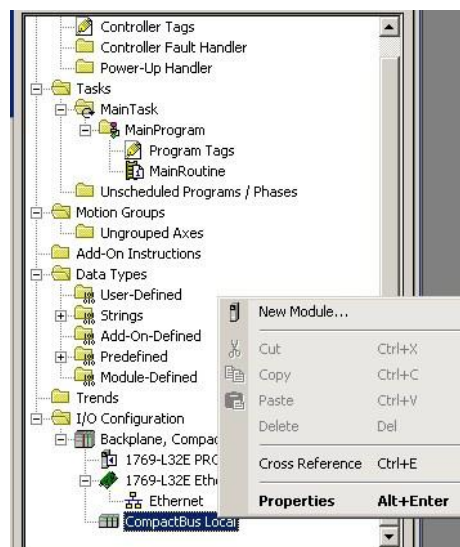


Figura 19.4 Guardado en la ruta de preferencia

Para agregar un nuevo módulo se hace click derecho CompactBus Local, New Module.

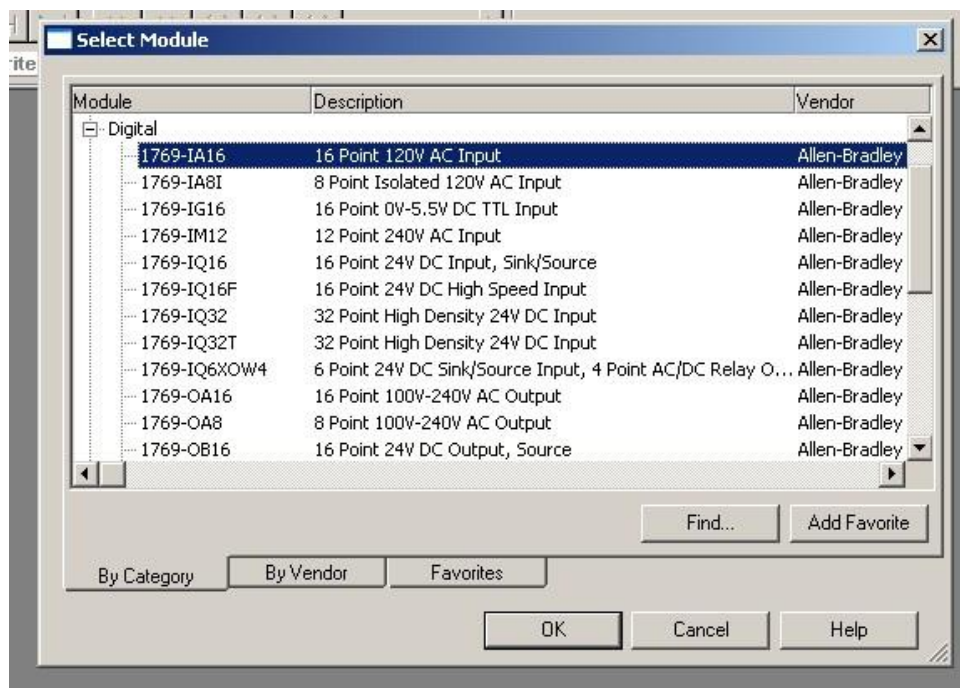


Figura 19.5 Ventana de elección de módulo

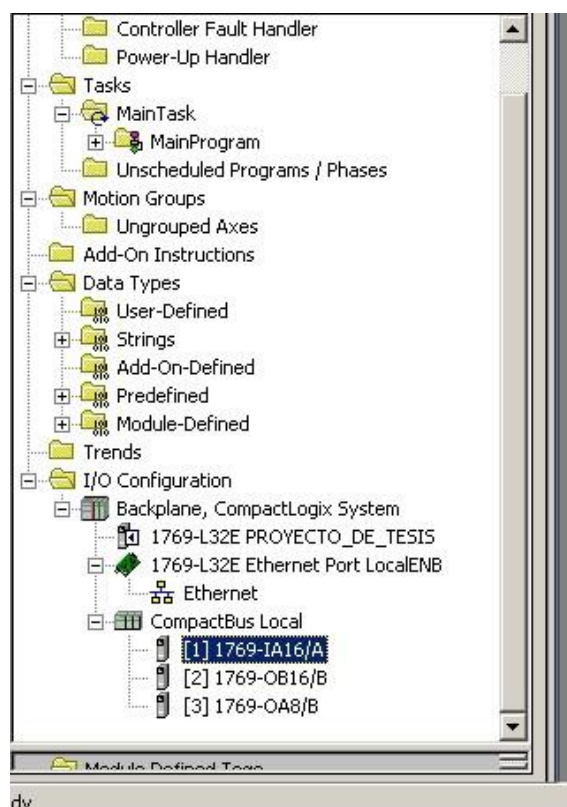


Figura 19.6 Ventana de módulos de expansión

Para nuestro proyecto añadiremos tres módulos de expansión.

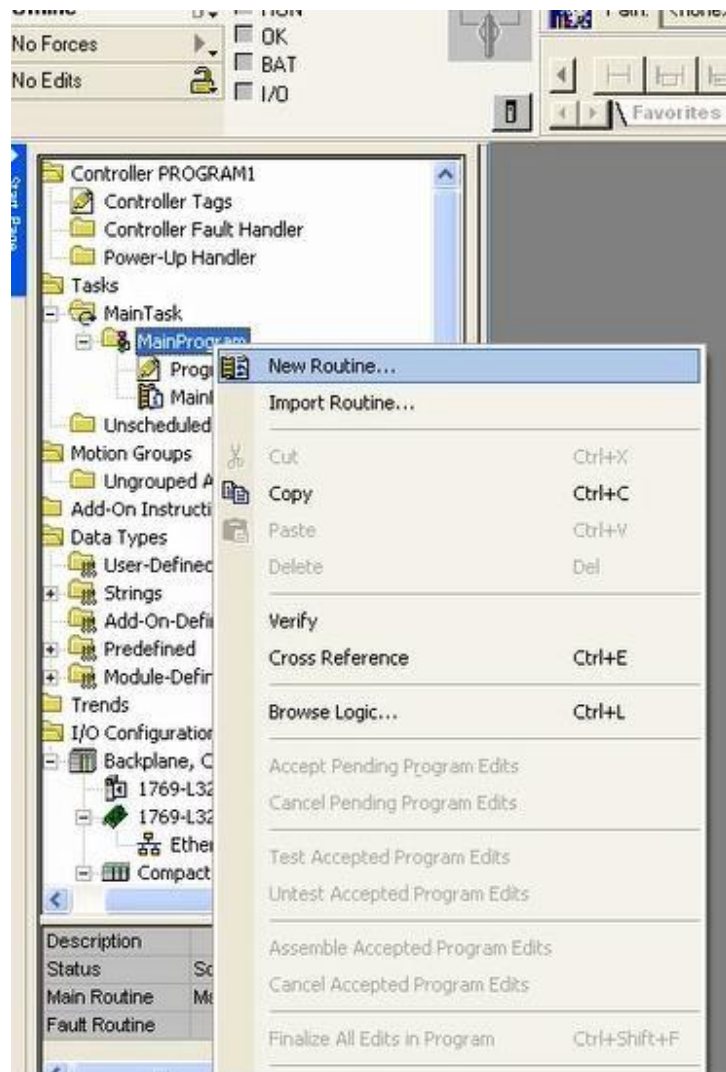


Figura 19.7 Programación de New routine



Figura 19.8 Ladder diagram

A continuación, crearemos una nueva rutina en el lenguaje Ladder.

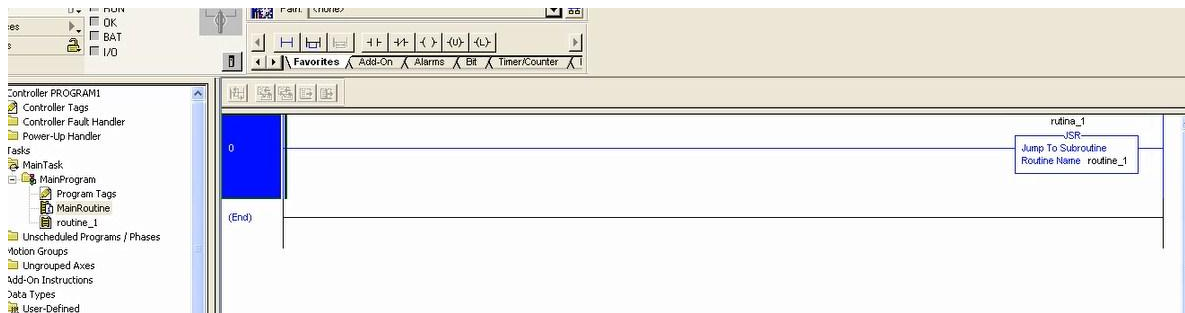


Figura 19.9 Creando rutina en el lenguaje ladder

En MainRoutine se llama a la rutina 1 (routine\_1) a través de la instrucción JSR, la misma que su a vez servirá para llamar a las nuevas rutinas de programación que se vayan creando.

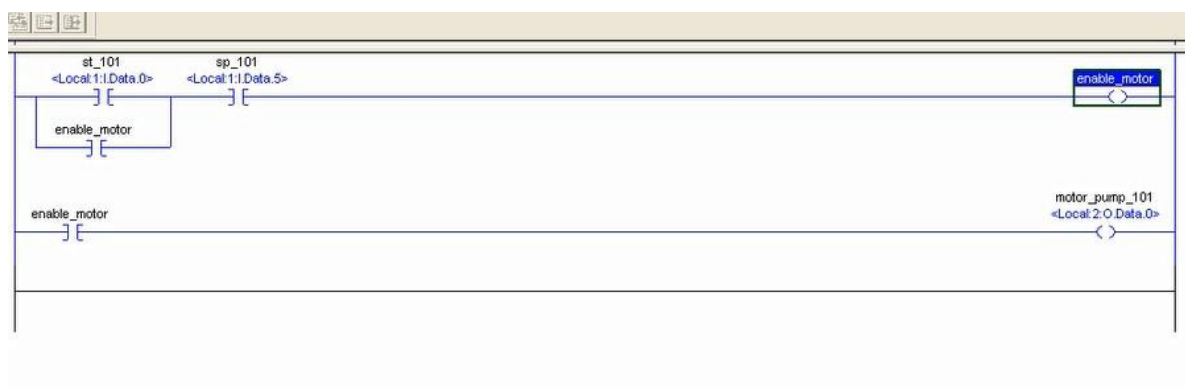


Figura 19.10 En MainRoutine (routine\_1) a través de la instrucción JSR

En la rutina 1 (routine\_1) se crea el programa en lenguaje ladder.



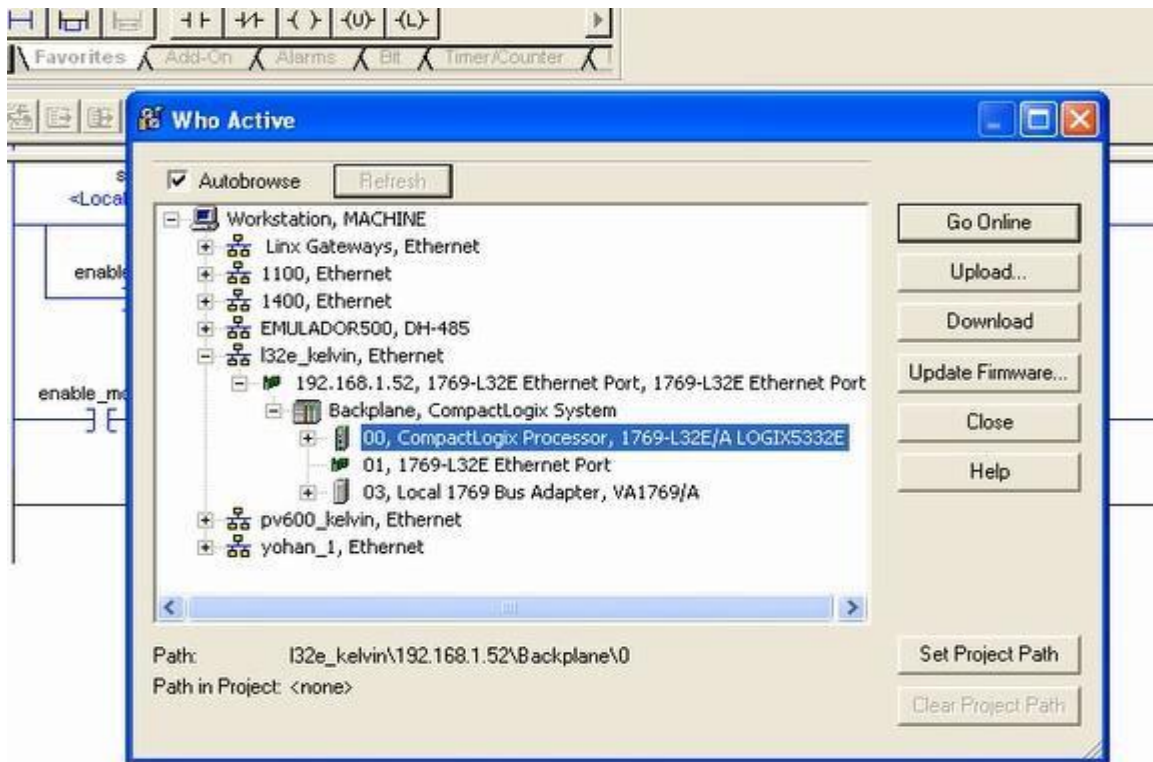


Figura 19.11 Creación del programa ladder

Luego de crear el programa ladder y haber cargado sus respectivos módulos de expansión, se procederá a cargar el driver para poder hacer la descarga al PLC.

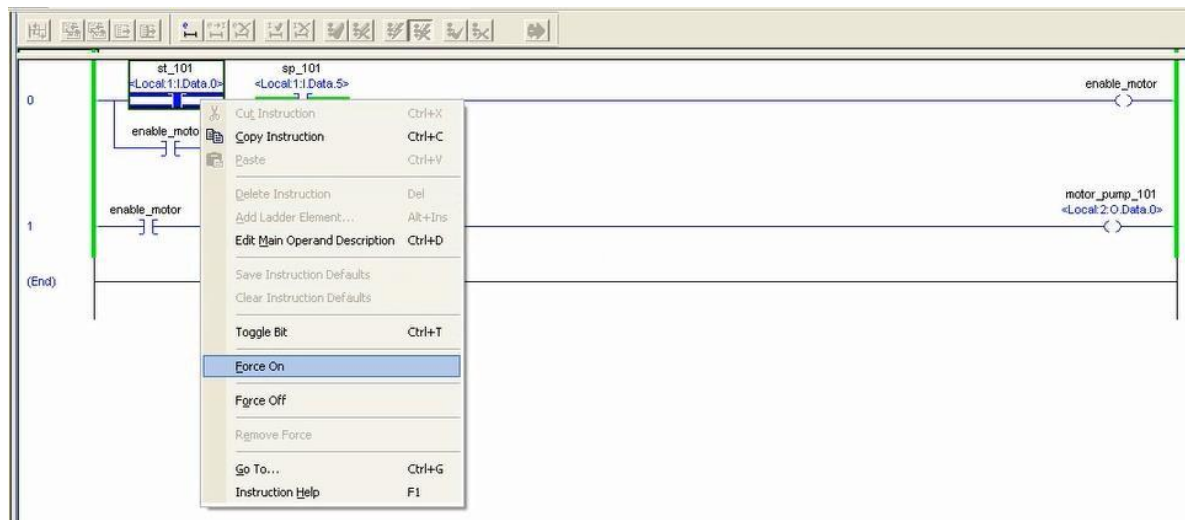


Figura 19.12 Procedimiento de cargar el driver para descargar al PLC

Para activar en el motor en nuestro ejemplo haremos click derecho y mediante un bit forzado en st\_101 el cual activar enable\_motor y este así mismo activará a motor\_pump\_101.

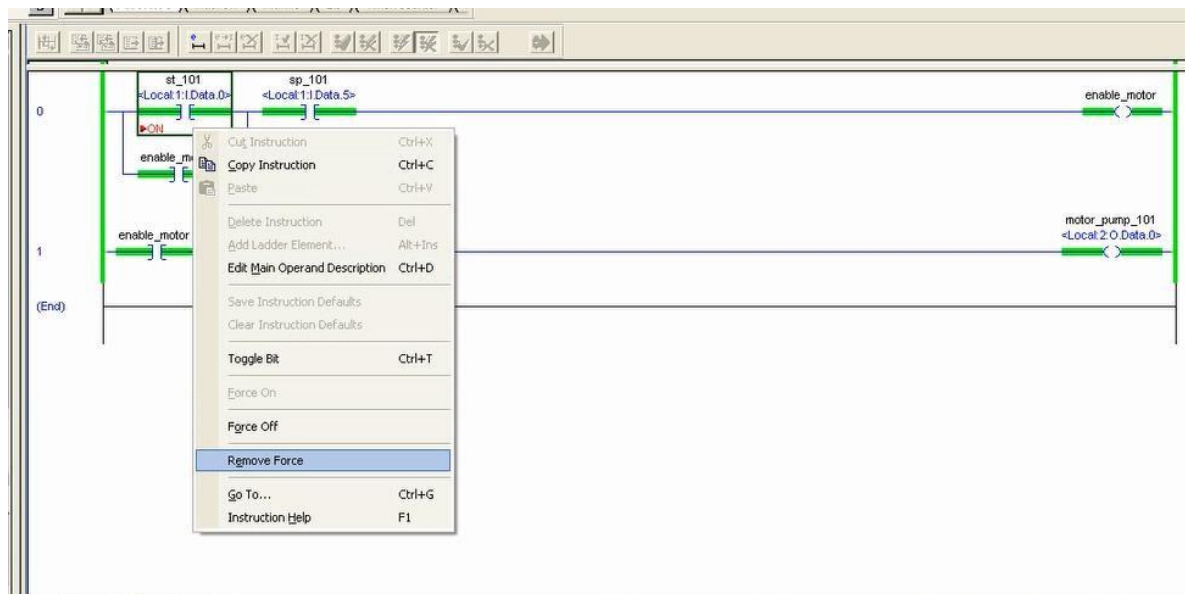


Figura 19.13 Remover el bit forzado

Para remover el bit forzado, click derecho luego en Remove Force.

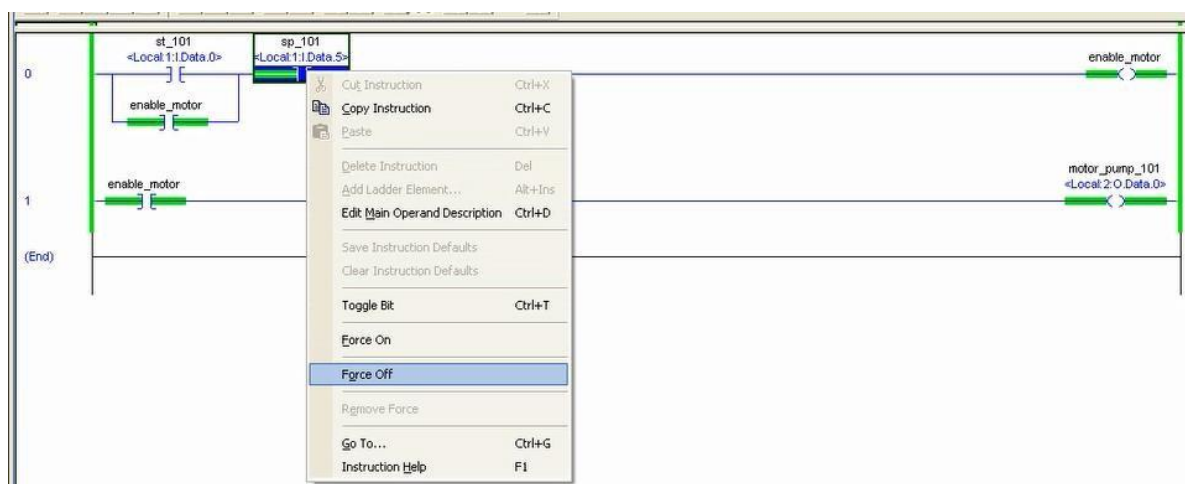


Figura 19.14 Apagado del motor

Para apagar el motor, click derecho en sp\_101 (stop) y luego en force Off.



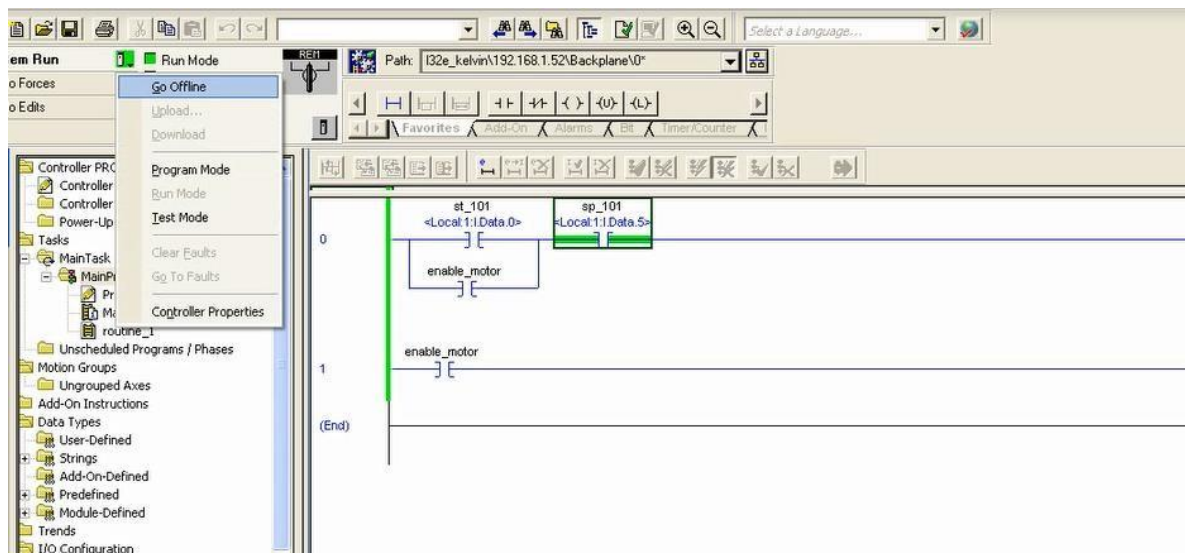


Figura 19.15 Saliendo de línea

Por último, procederemos a salir de línea.

## FactoryTalk View

El software FactoryTalk View Machine Edition (ME) es una aplicación HMI versátil que ofrece una solución dedicada y potente para dispositivos de interfaz de operador a nivel de máquina. Como un elemento integral de la solución de visualización de Rockwell Automation, FactoryTalk View Machine Edition proporciona gráficos de calidad superior, gestión de usuarios en tiempo de ejecución, cambio de idioma y el tiempo más rápido de puesta en marcha a través de un entorno de desarrollo común.

FactoryTalk View Machine Edition permite una interfaz de operador para diferentes plataformas, incluyendo soluciones de escritorio PanelView Plus y Windows y consiste en:

- FactoryTalk View Studio: Software de configuración para desarrollar y probar aplicaciones HMI.
- ME Station FactoryTalk View: Una solución tradicional "stand-alone" HMI que proporciona una interfaz de operador integrado que se ejecuta la misma aplicación de operador en el PanelView™ Plus 7, PanelView™ Plus 6, MobileView™ terminal, Rockwell Automation computadoras industriales, u otro PC industrial.

## Ventana de inicio de FactoryTalk View Studio

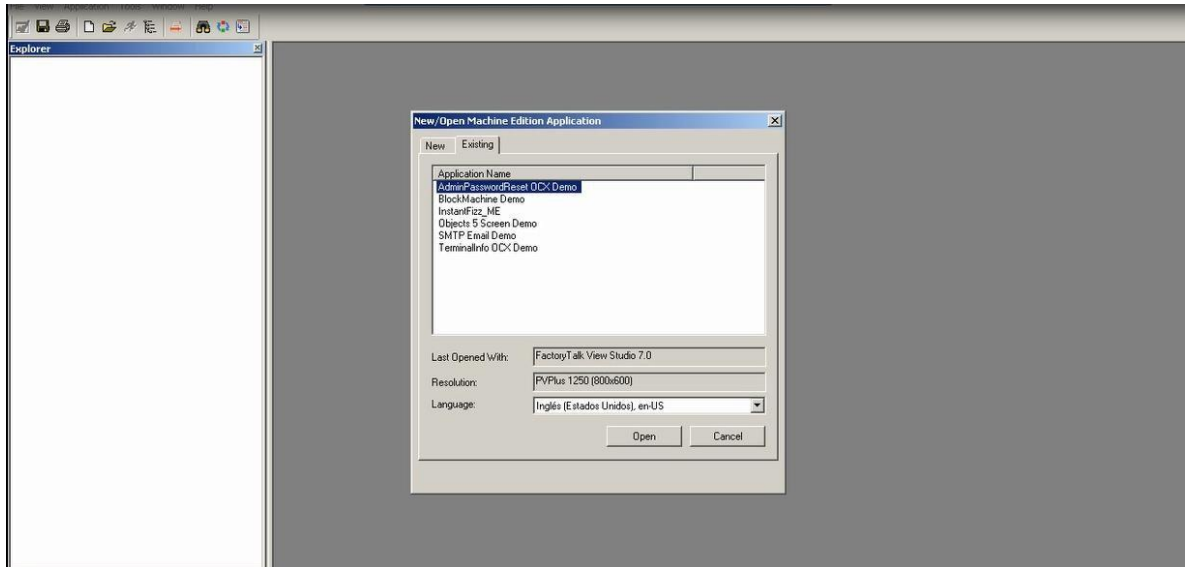


Figura 20.1 Ventana de inicio de FactoryTalk View Studio

Click en la pestaña new, luego en colocamos el nombre del proyecto y a continuación en create.

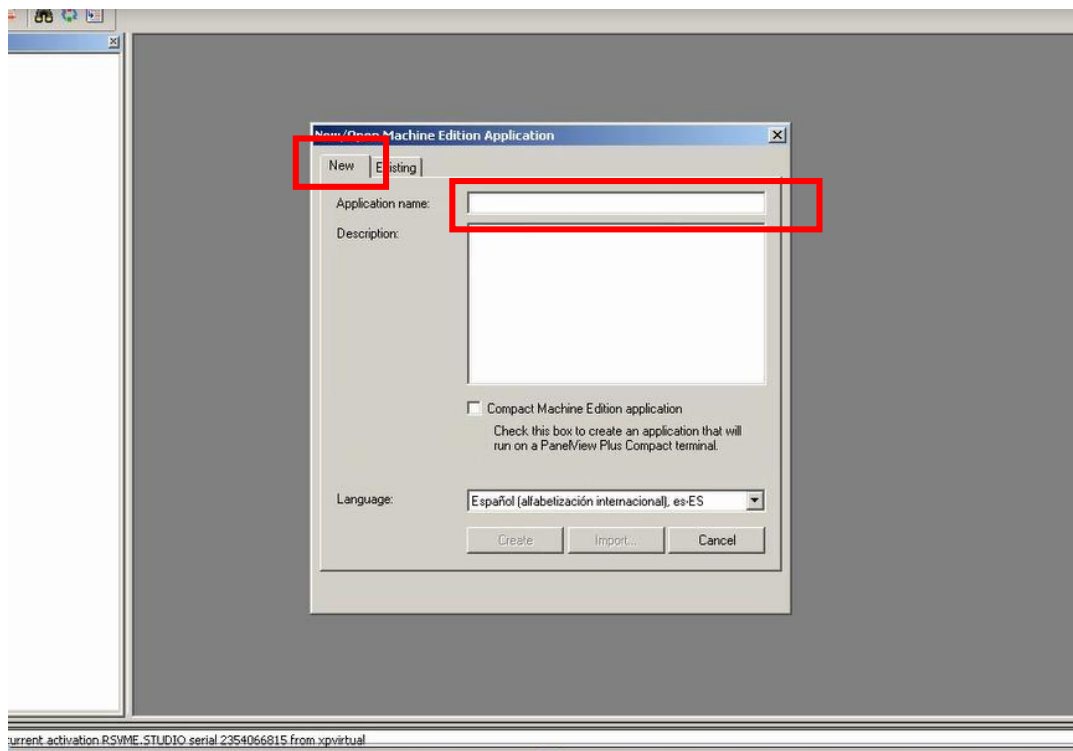


Figura 20.2 Click en la pestaña new

Se nos abrirá una ventana en la que escogeremos la pantalla HMI que utilizaremos, en nuestro caso será la PVPlus 400/600

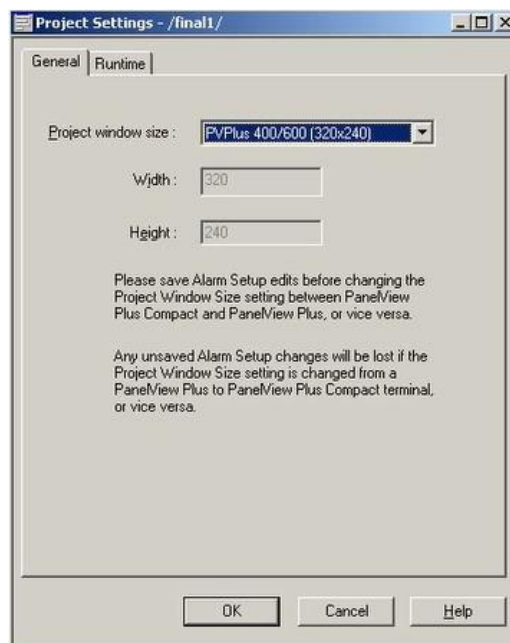


Figura 20.3 Escogiendo la pantalla HMI: PVPlus 400/600

En la siguiente ventana seleccionaremos Create new configuration, y click en Finalizar.

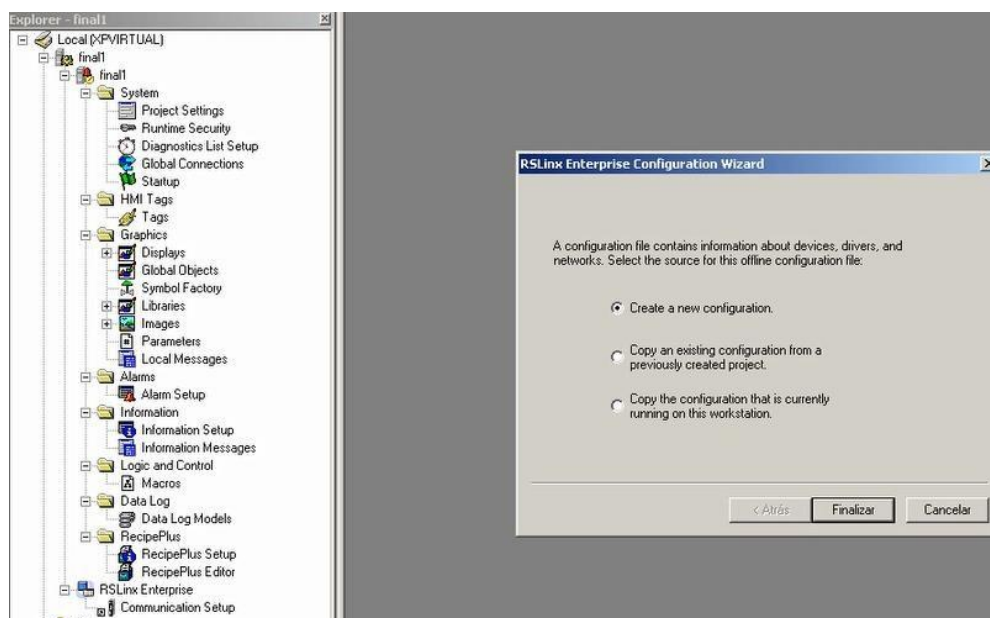


Figura 20.4 Selección de Create new configuration, y click en Finalizar

Para establecer la comunicación del PLC y HMI con la computadora:

1. Añadiremos los driver haciendo Click en Ethernet, Ethernet.
2. En la lista desplegable que nos sale a continuación escogemos el PLC que utilizaremos en nuestro proyecto.

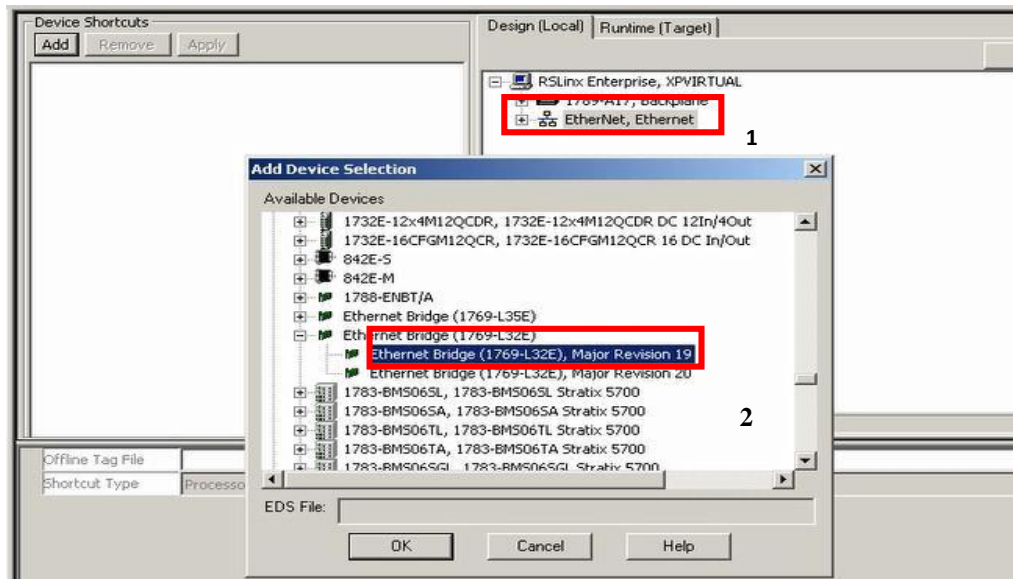


Figura 20.5 Establecer la comunicación del PLC y HMI con la computadora

En la siguiente ventana estableceremos la dirección IP del PLC con el cual nos comunicaremos.

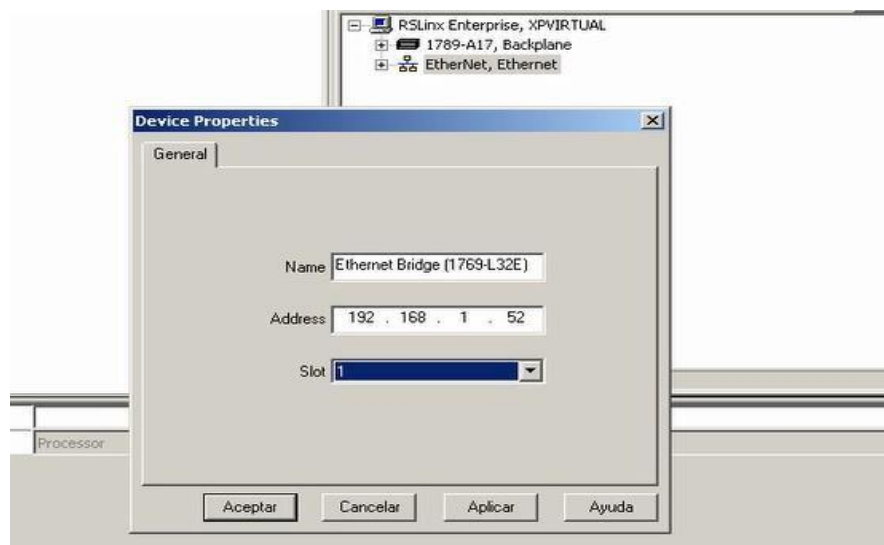


Figura 20.6 Estableceremos la dirección IP del PLC

Se sigue los mismos pasos para establecer la comunicación con la pantalla HMI.

Una vez terminada la configuración preliminar, procederemos con la configuración de la pantalla HMI añadiendo a la pantalla botones de la librería, en este caso el botón Momentary Push Button.

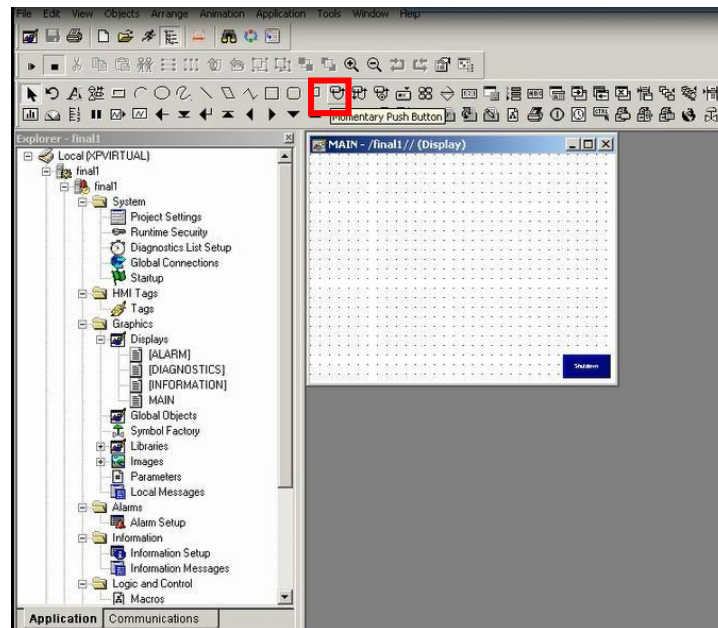


Figura 20.7 Configuración de la pantalla HMI: botón Momentary Push Button

En la pestaña General de las propiedades de dicho botón podremos cambiar de color, forma, entre otros.

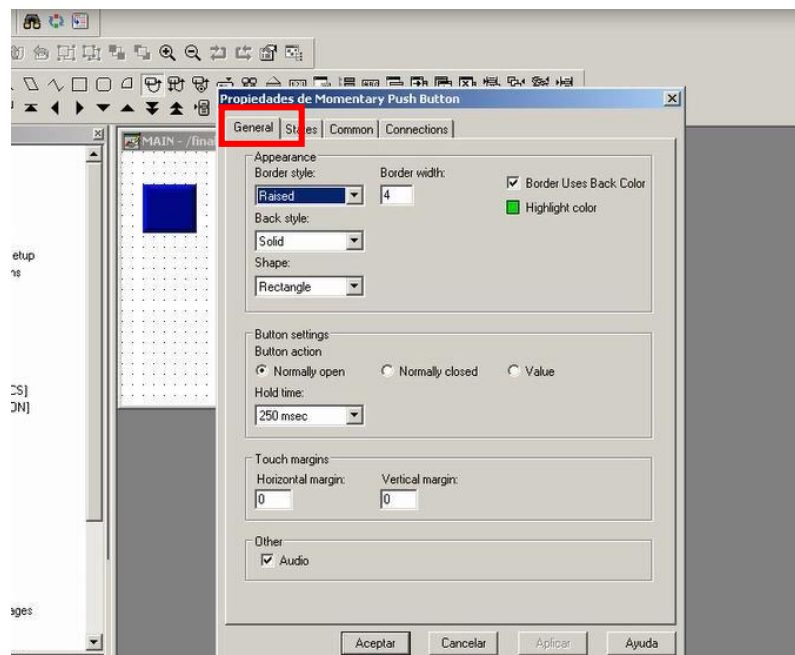


Figura 20.8 En la pestaña General cambiar de color, forma, entre otros

En la pestaña states, podremos ponerle nombre al botón y cambiar el color entre estados por ejemplo para State 0: verde y para State 1: rojo

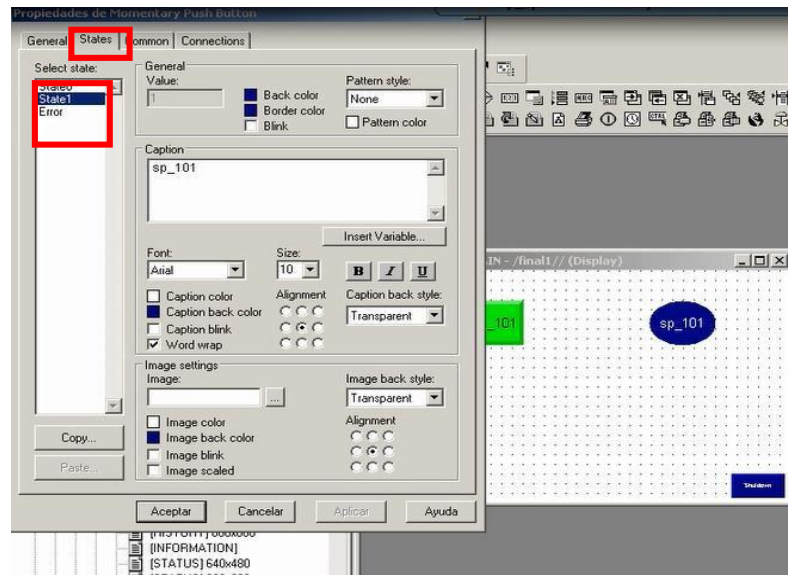


Figura 20.9 En la pestaña states, nombre al botón y cambiar el color entre estados

En la pestaña Connections añadiremos el Tag al botón según nuestra programación Ladder que se realizó en en RSLogix 5000.

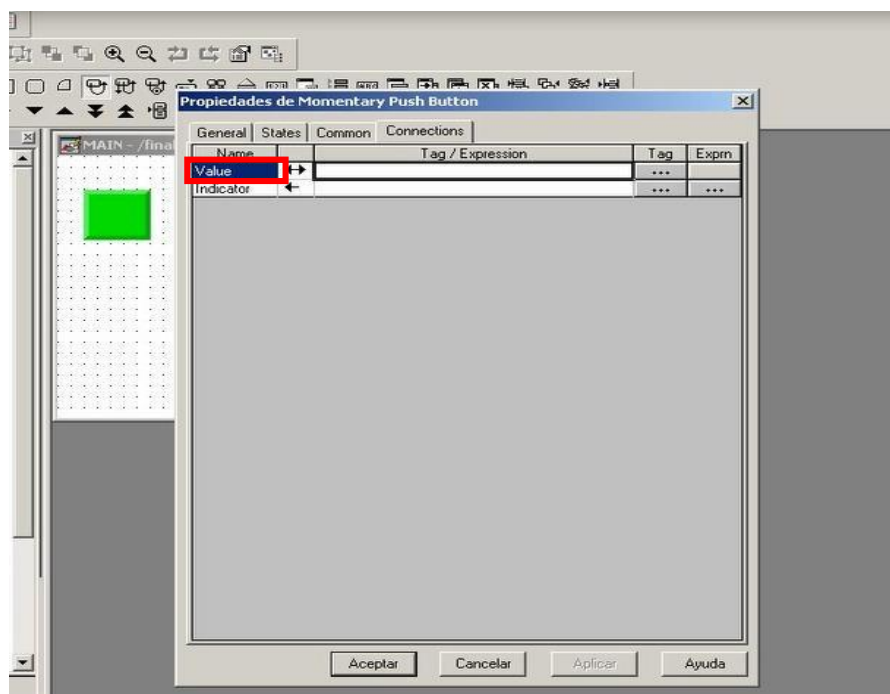


Figura 20.10 En la pestaña Connections añadiremos el Tag al botón



En las siguientes ventanas se procederá a llamar los tag de nuestro programa en ladder a cada botón que tengamos en nuestra pantalla principal.

1. Click y se abrirá una nueva pantalla con los tag a utilizar.
2. En la carpeta Program:MainProgram encontramos dichos tag.
3. Son los tag que utilizamos en nuestro programa ladder.

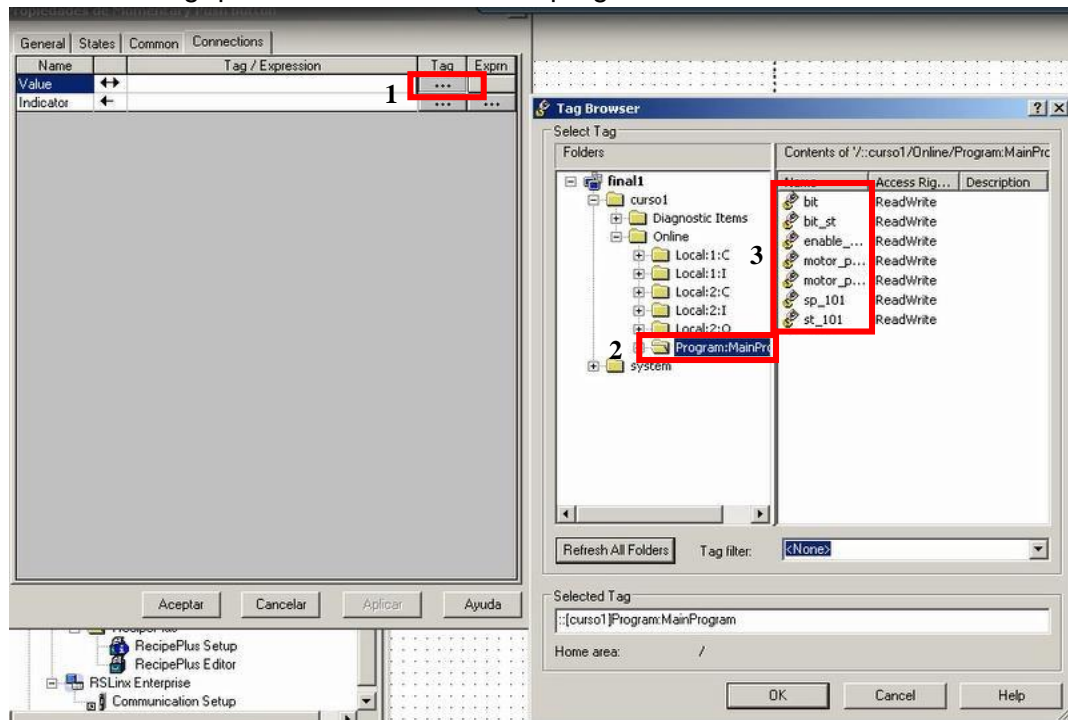


Figura 20.11 Se llama a los tag de nuestro programa en ladder a cada botón

En la siguiente imagen se observa la pantalla con los dos botones que utilizaremos con sus respectivos tag.

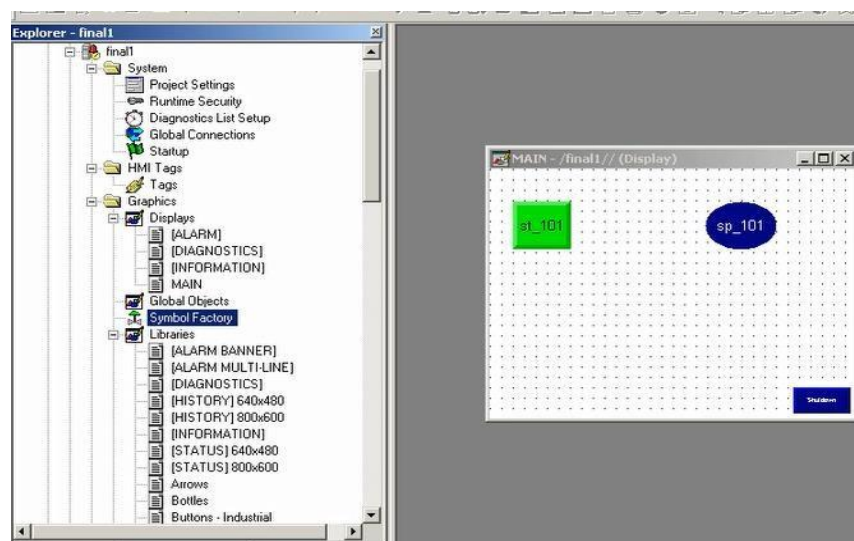


Figura 20.12 Pantalla con los dos botones con sus tags

En Factory Talk existen muchas librerías, para nuestro proyecto utilizaremos 3-D Pushbuttons Etc.

1. Haciendo click en 3-D Pushbuttons Etc desplegaremos todos los botones que existen.
2. Para llevar estos botones a nuestra pantalla principal, haremos click derecho en Copy as Picture.

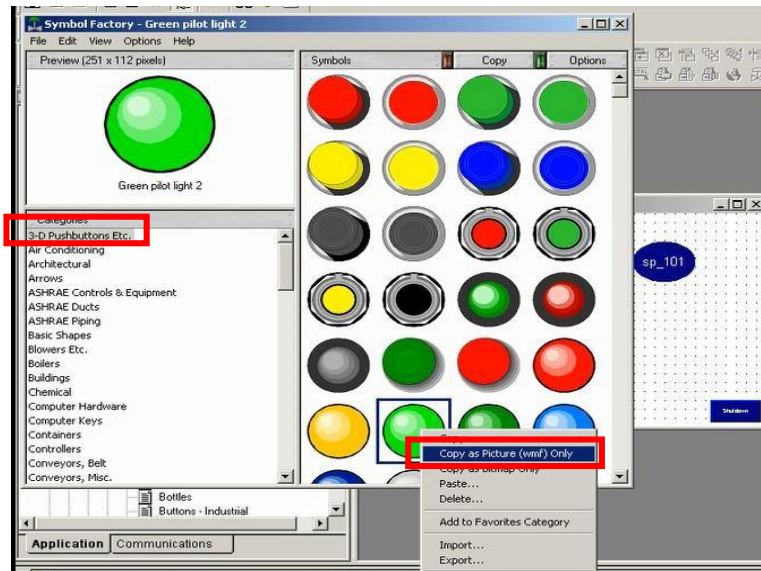


Figura 20.13 En pantalla principal hacemos click derecho en Copy as Picture

Para configurar cada botón se procede de la misma manera que se muestra en las imágenes anteriores.

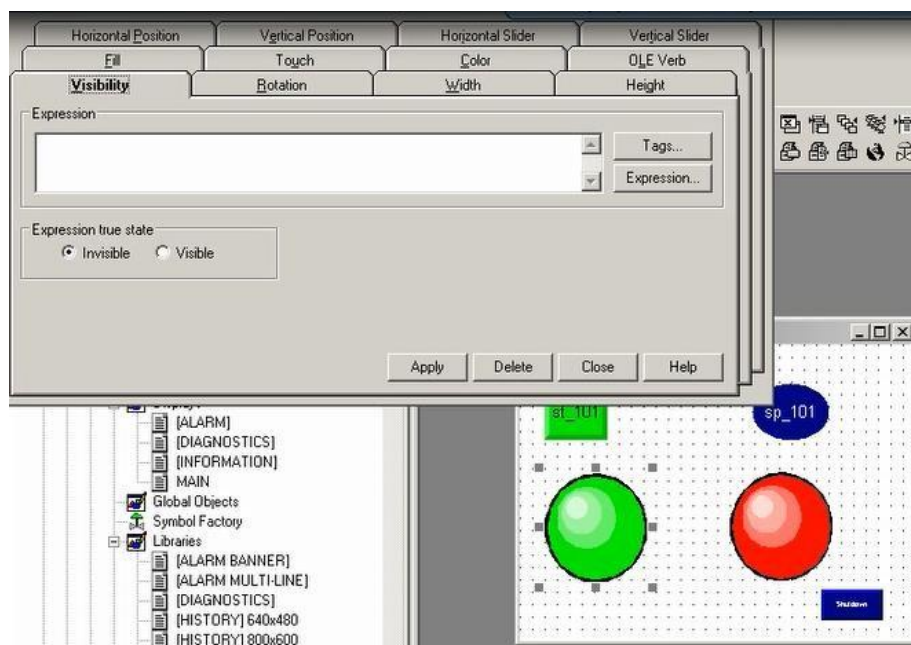


Figura 20.14 Configuración de cada botón



Los tag que se le asignará serán los mismos que se tienen en la programación ladder antes mostrada.

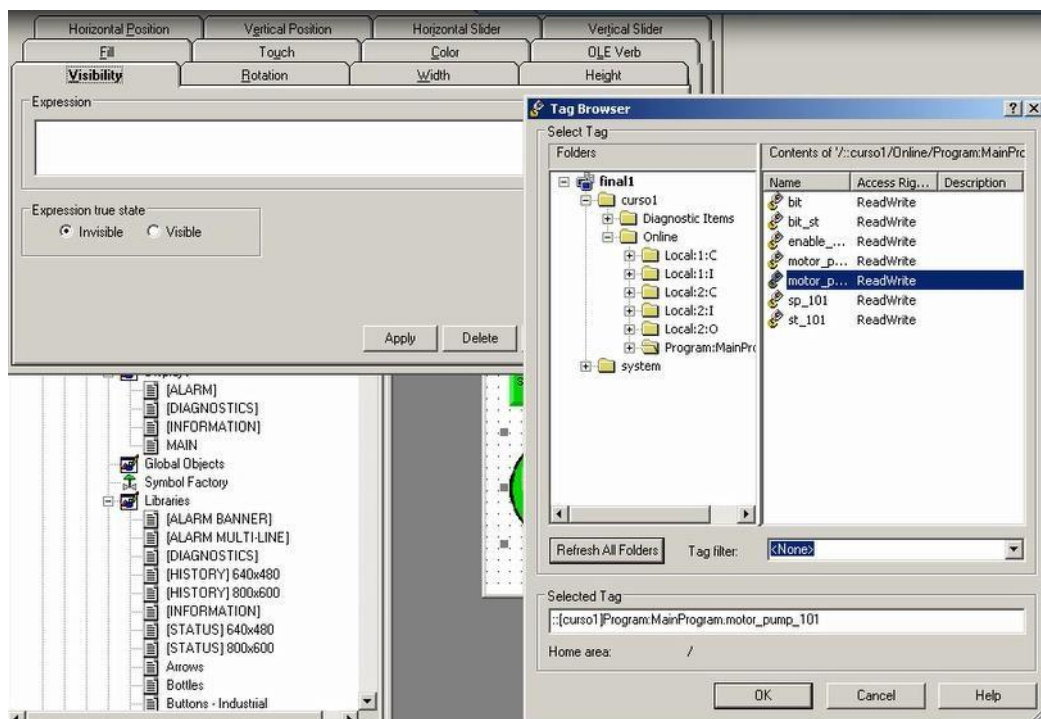


Figura 20.15 Para correr el programa se hace click en test application.

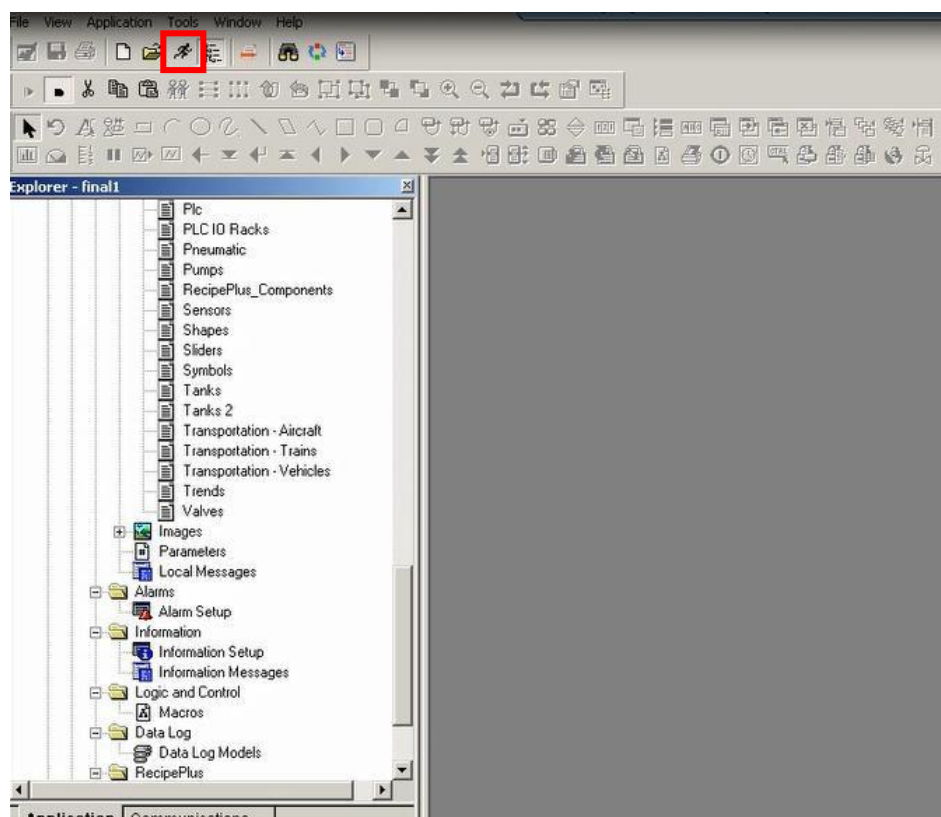


Figura 20.16 Para correr el programa se hace click en test application

## Capítulo 4

### Modelado del sistema y adquisición de datos

#### 4.1. Adquisición de Datos de la Planta.

Para el proceso de adquirir datos se usó el software RSlogix 500 de Rockwell Automation software de programación del controlador Micrologix 1400 para luego enviar mediante mensajería utilizando protocolo CIP los datos adquiridos al CompactLogix L32E y el software factorytalk view para la visualización de los datos adquiridos y el control de la planta.

##### 4.1.1 Programación en RSlogix 500.

Esta rutina se muestra en la Figura 4.1, la secuencia consiste en utilizar las funciones básicas de la planta, es decir ponerla en marcha y parada, además de guardar las variables físicas (TRANSMISOR DE NIVEL, TRANSMISOR DE PRESIÓN, TRANSMISOR FLUJO, VARIADOR).

Esta rutina realizada en lenguaje ladder, permite poner en funcionamiento la planta y leer datos del sensor de nivel, flujo y nivel para controlar el variador, en la Tabla 2.1 se muestran las variables utilizadas en el proceso.

Tabla 2.1: Direcciones Físicas del PLC utilizadas

Nombre de Variable	Tipo	Dirección Física
TRANSMISOR DE NIVEL	DOBLE ENTERA	PLC MICRO LOGIX 1400
TRANSMISOR DE PRESION	DOBLE ENTERA	PLC MICRO LOGIX 1400
TRANSMISOR DE FLUJO	DOBLE ENTERA	PLC MICRO LOGIX 1400
VARIADOR	DOBLE ENTERA	PLC MICRO LOGIX 1400

Las rutinas para la adquisición de Datos se crearán en lenguaje Ladder en el software rslogix 500 de Rockwell Automation para la programación del controlador Micrologix 1400 para luego enviar mediante mensajería utilizando protocolo CIP los datos adquiridos al CompactLogix L32E.

### LADDER 3: subrutina para el escalamiento del transmisor de flujo

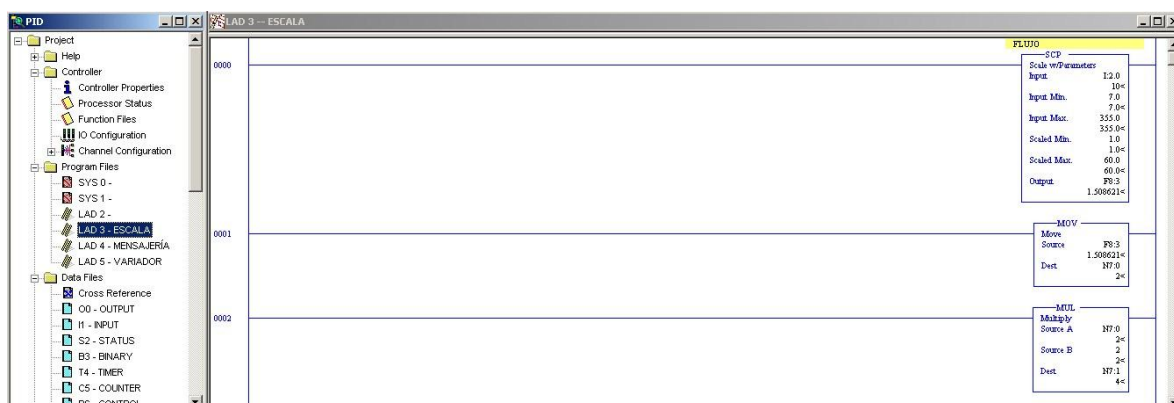


Figura 21.1 subrutina para el escalamiento del transmisor de flujo

### LADDER 3: Subrutina para escalamiento del trasmisor de presión



Figura 21.2 subrutina para el escalamiento del transmisor de presión

### LADDER 3: Subrutina para escalamiento del trasmisor de nivel



Figura 21.3 Subrutina para el escalamiento del transmisor de nivel

### LADDER 3: Subrutina para escalamiento del variador

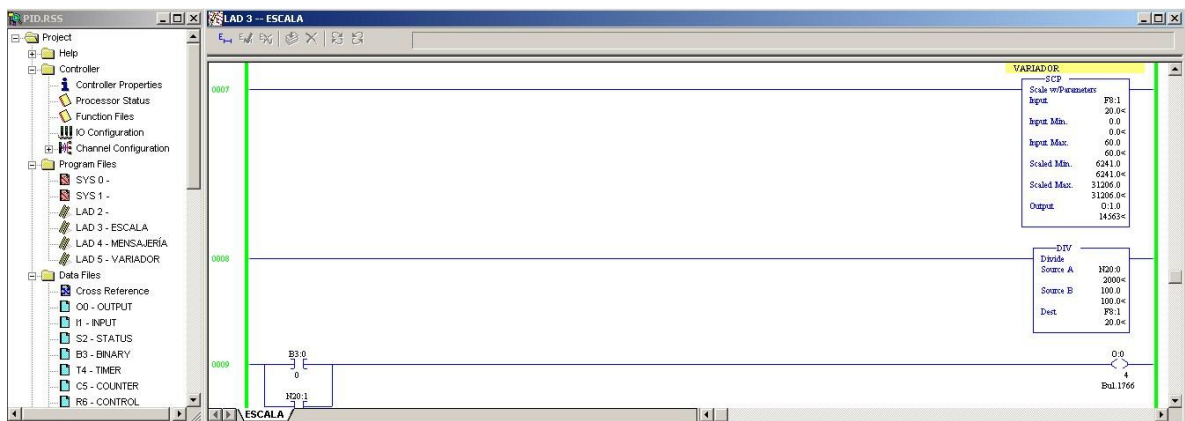


Figura 21.4 subrutina para el escalamiento del variador

LADDER 2: Esta rutina se encargará de llamar a las subrutinas con los Datos adquiridos

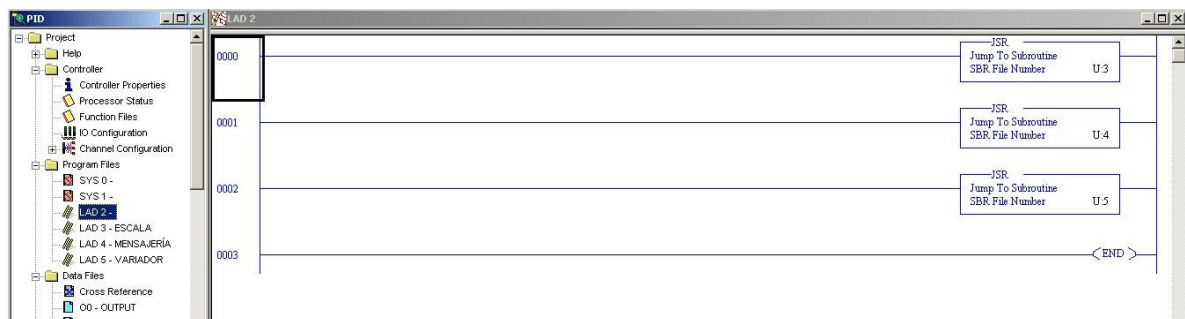


Figura 21.5 Esta rutina llamará a las subrutinas con los Datos adquiridos

LADDER 4: Está rutina se encargará de transmitir los Datos mediante mensajería utilizando protocolo CIP al PLC CompactLogix L32E.

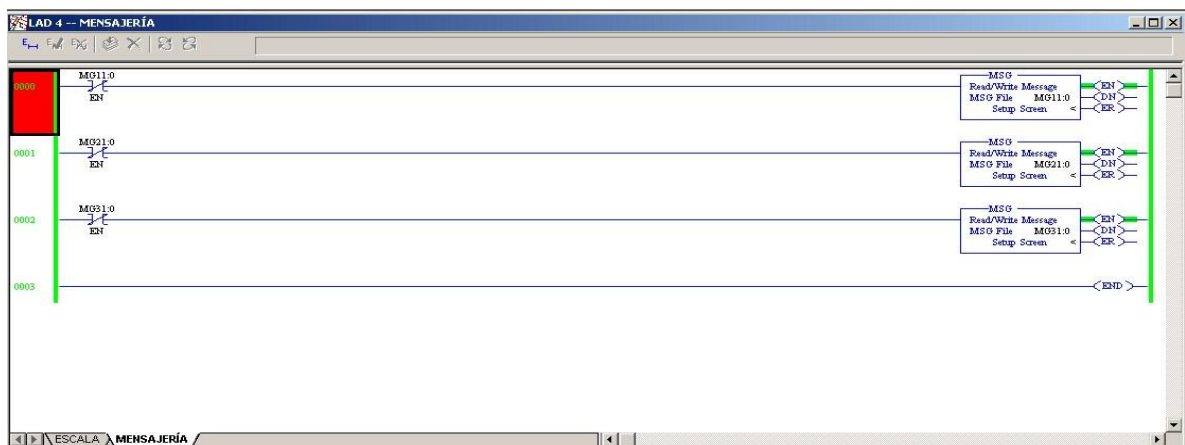


Figura 21.6 Transmisión de Datos utilizando protocolo CIP al PLC CompactLogix L32E

#### 4.1.2 Programación en factorytalk view.

En el panel de inicio muestra la información del proyecto realizado y los integrantes, presionamos en el botón IR A PROCESO el cual nos llevara a otro panel.



Figura 22.1 PANTALLA DE INICIO. Programación en factorytalk view

La secuencia consiste en dar la orden de arranque y parada mediante los botones STAR y STOP respectivamente, en la imagen de la bomba se prendera un led el cual indica que la planta está operando, los sensores instalados empezaran a transmitir los datos obtenidos al PLC Micro logix 1400 el cual enviará mediante mensajería al PLC Compact logix L32E el cual se encargará de ejecutar el control en cascada mediante la programación de diagrama de bloques.

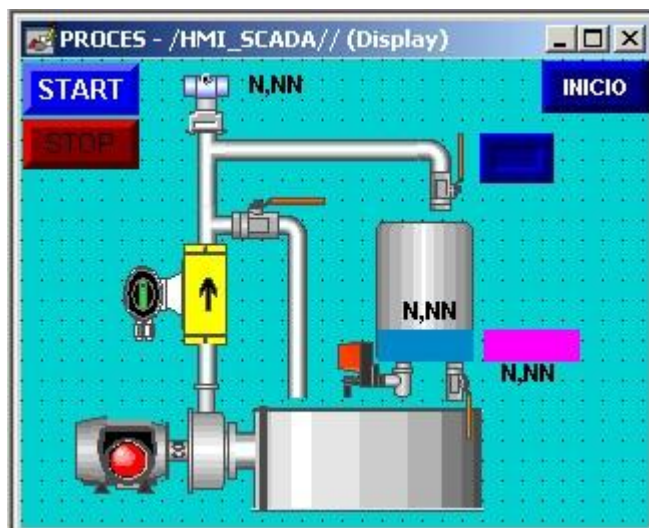


Figura 22.2 PANTALLA DE PROCESO. Programación en factorytalk view

#### 4.1.3 Adquisición de Tags en el proceso.



Llamamos los Datos adquiridos en el proceso mediante Tags del PLC L32E los cuales controlaran el proceso mediante los botones mostrados en los paneles antes mostrados.

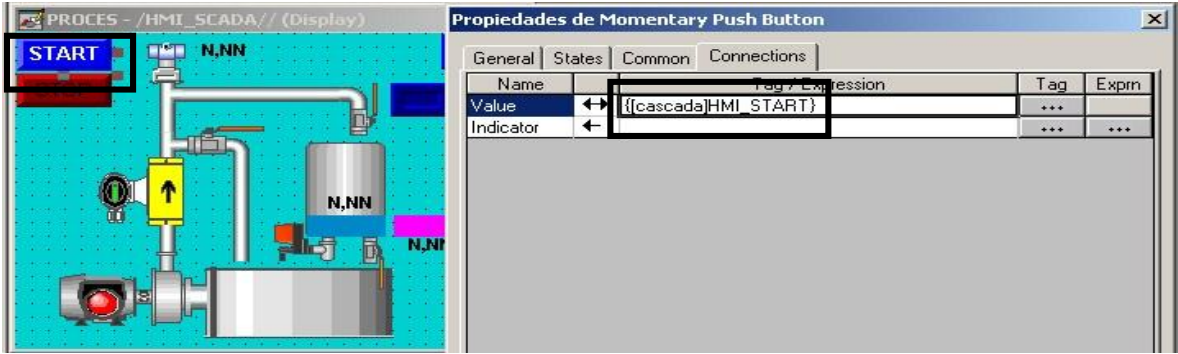


Figura 23.1 El tag HMI\_START se adquiere del PLC L32E



Figura 23.2 El tag HMI\_STOP se adquiere del PLC L32E

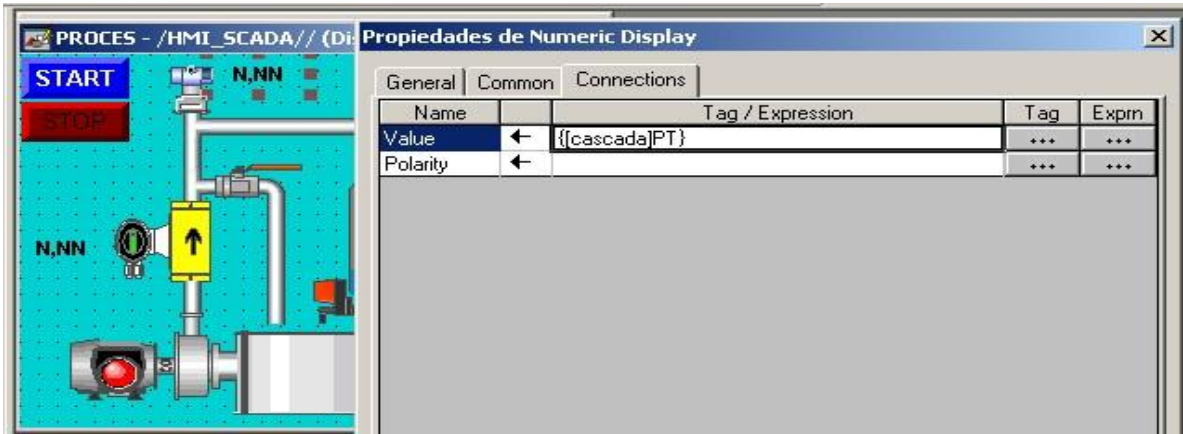


Figura 23.3 El tag PT (transmisor de presión) se adquiere de PLC L32E

El tag PT (transmisor de presión) se adquiere de PLC L32E y a su vez este mediante mensajería adquiere el tag del PLC MICROLOGIX 1400.

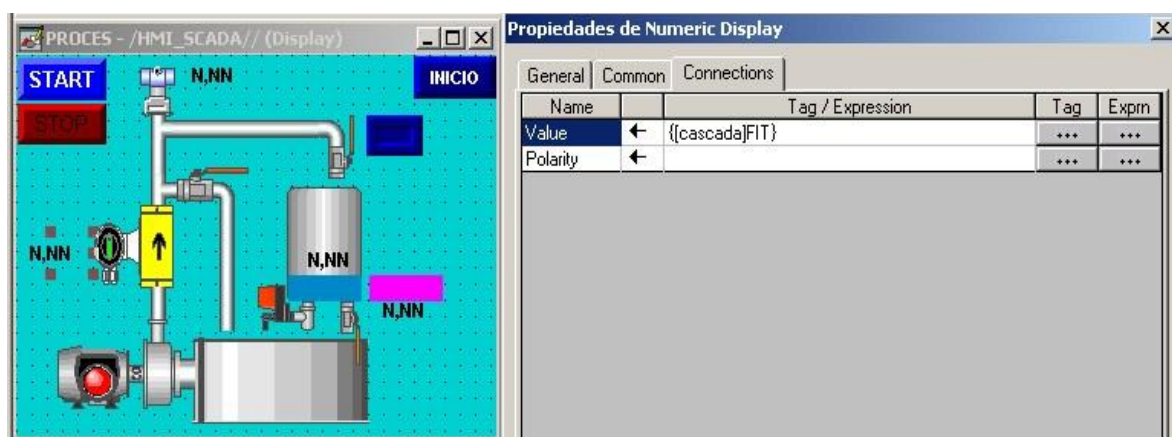


Figura 23.4 El tag FIT (transmisor indicador de flujo) se adquiere de PLC L32E

El tag FIT (transmisor indicador de flujo) se adquiere de PLC L32E y a su vez este mediante mensajería adquiere el tag del PLC MICROLOGIX 1400.

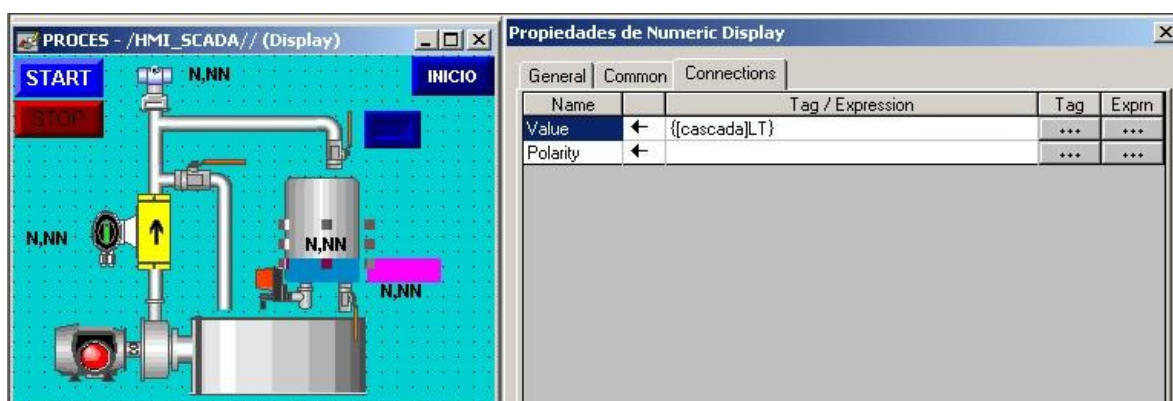


Figura 23.5 El tag LT (transmisor de nivel) de adquiere de PLC L32E

El tag LT (transmisor de nivel) de adquiere de PLC L32E y a su vez este mediante mensajería adquiere el tag del PLC MICROLOGIX 1400.

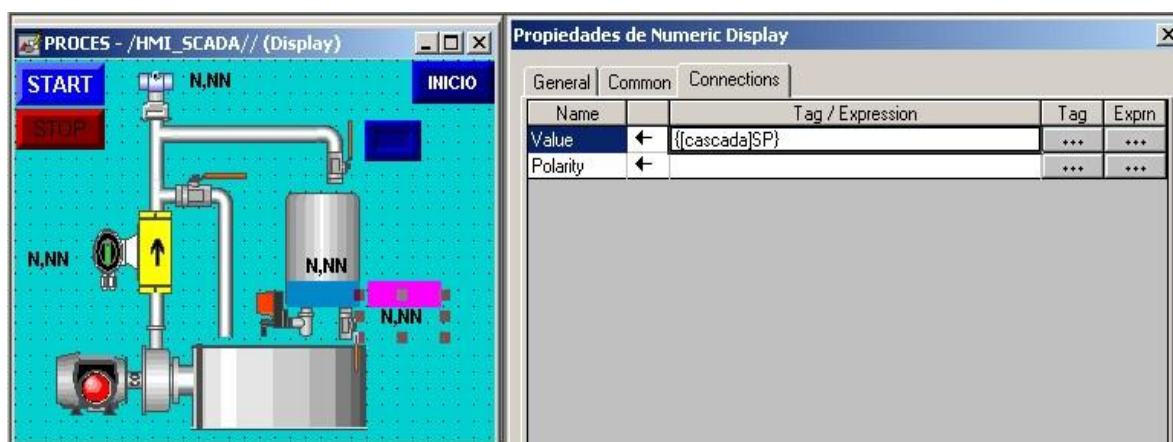


Figura 23.6 El tag SP (Set point) de adquiere de PLC L32E.

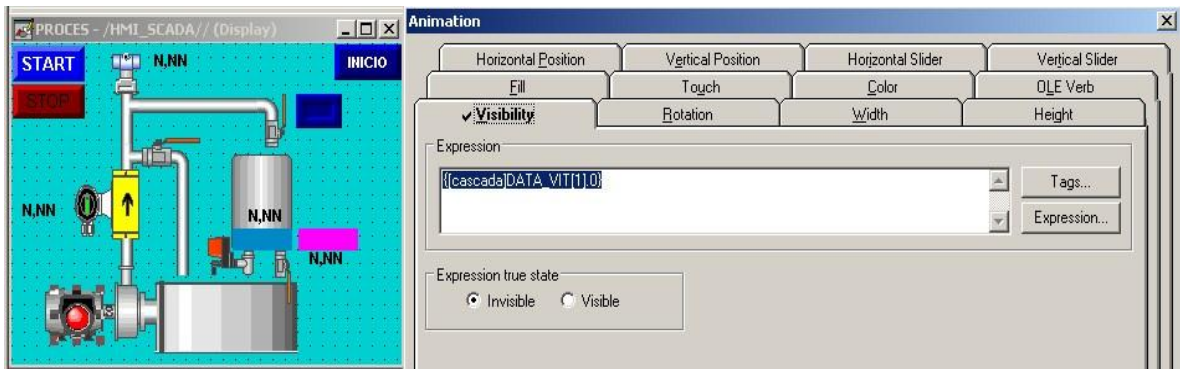
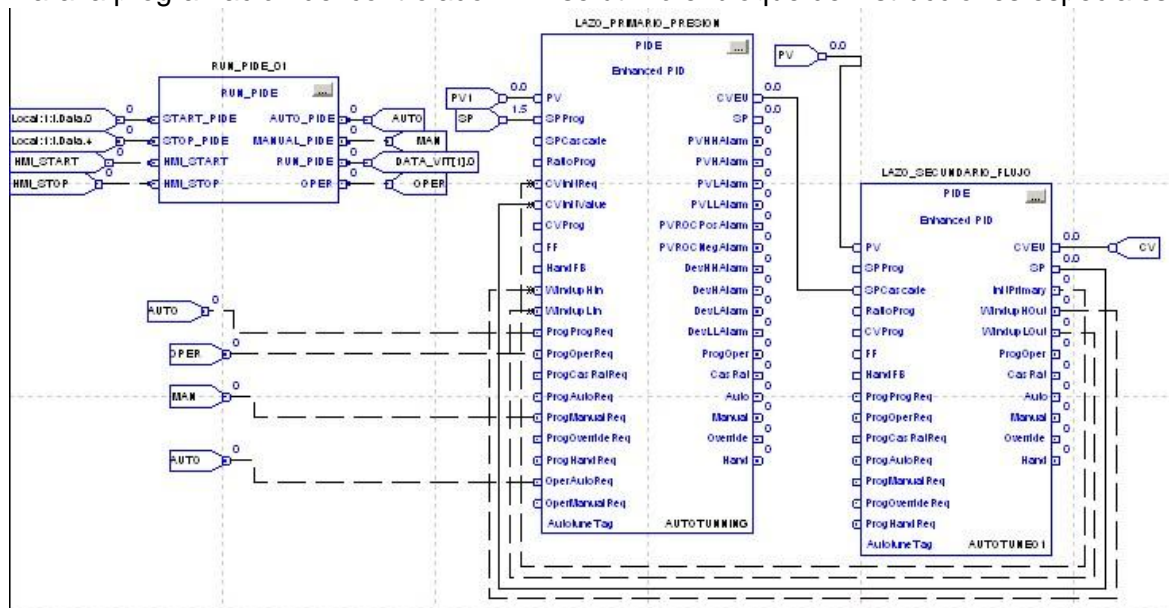


Figura 23.7 El tag DATA\_VIT (VARIADOR DE FRECUENCIA) se adquiere de PLC L32E

El tag DATA\_VIT (VARIADOR DE FRECUENCIA) se adquiere de PLC L32E y a su vez este mediante mensajería adquiere el tag del PLC MICROLOGIX 1400.

#### 4.1.4. Bloque PID

Para la programación del controlador PID se utilizó el bloque de instrucciones especiales



“PIDE”. En la ilustración se muestra el bloque PIDE.

Figura 24.1 En la ilustración se muestra el bloque PIDE

Ilustración.- Programación en lenguaje de bloques del control en cascada Utilizando como LAZO PRIMARIO a la variable PRESION y como LAZO SECUENDARIO a la variable FLUJO.



**Creación del bloque RUN PIDE\_01.**

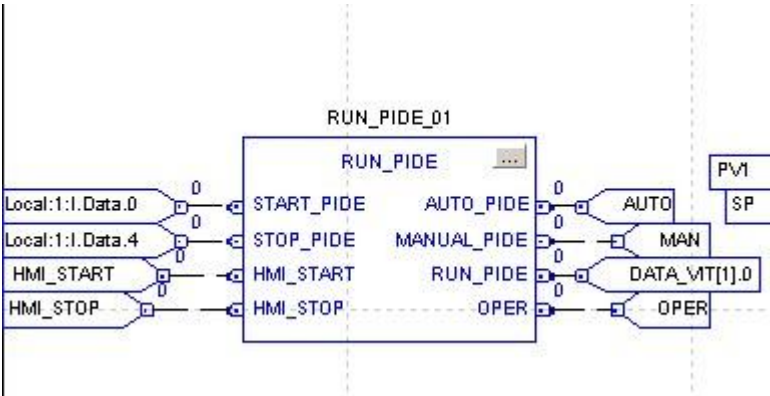


Figura 24.2 Creación del bloque RUN PIDE\_01

Este bloque se utiliza para hacer arrancar el control en cascada.

**Programación en Lader**

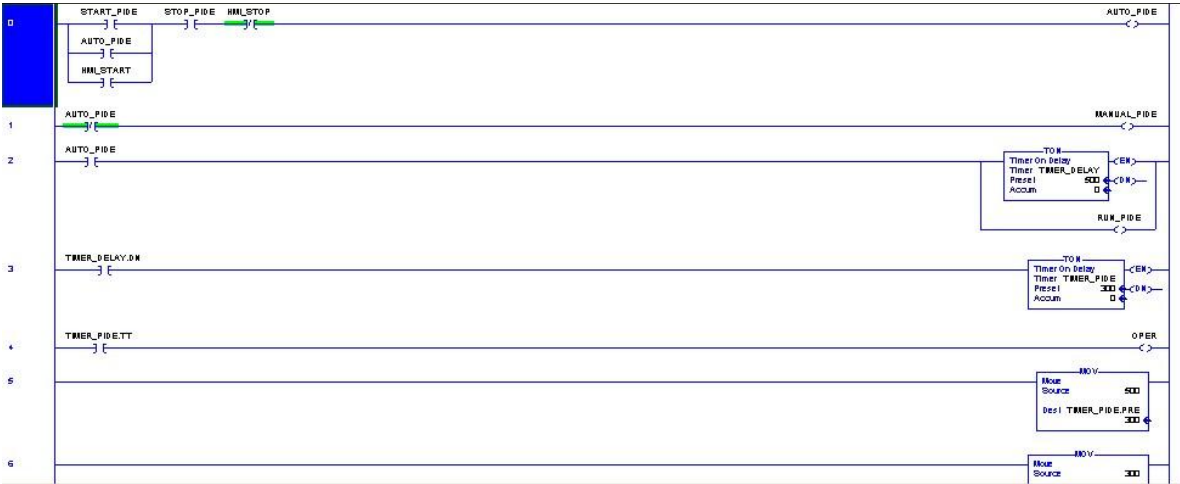


Figura 24.3 Programación en lenguaje ladder del bloque RUN\_PIDE\_01



Figura 24.4 Rutina principal, utilizada para llamar a las demás subrutinas.

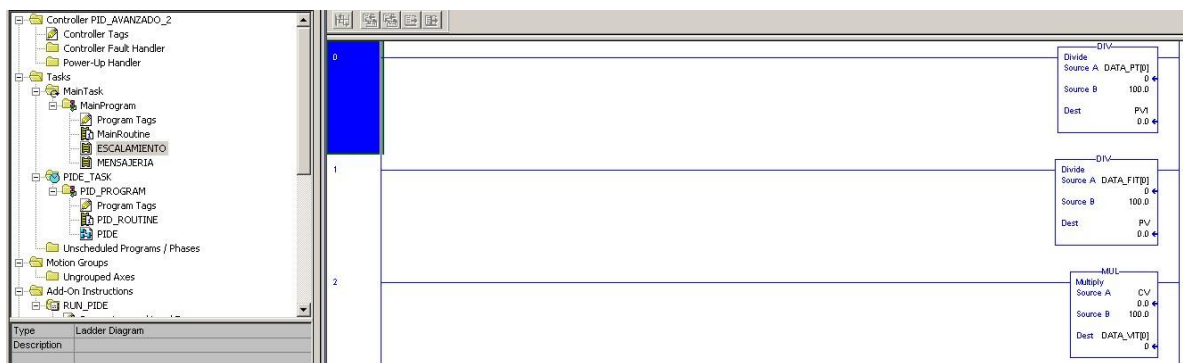


Figura 24.5 Rutina de escalamiento

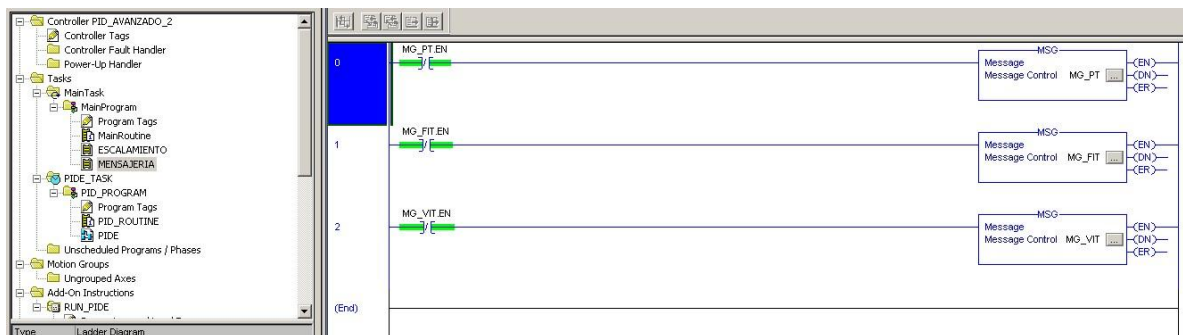


Figura 24.6 Rutina de mensajería

La ecuación PID utilizada por la instrucción PIDE es una ecuación de forma posicional con la opción de utilizar las ganancias de manera independiente o dependiente. Se utilizó la configuración de ganancias independientes donde las ganancias proporcional, integral y derivativa sólo afectan a los términos específicos proporcional, integral, o derivativo

respectivamente. La acción de cálculo de error y la ecuación del controlador son las siguientes:

$$E = SP \quad (4..)$$

$$CV = K_P E + K_I \int_0^t E dt - K_D \frac{dE}{dt} + BIAS \quad (4...)$$

Esta configuración se realiza en la pestaña de configuración general del cuadro de configuración de la instrucción PIDE. En la figura 25.1 se muestra el cuadro de configuración de la ecuación del PID.

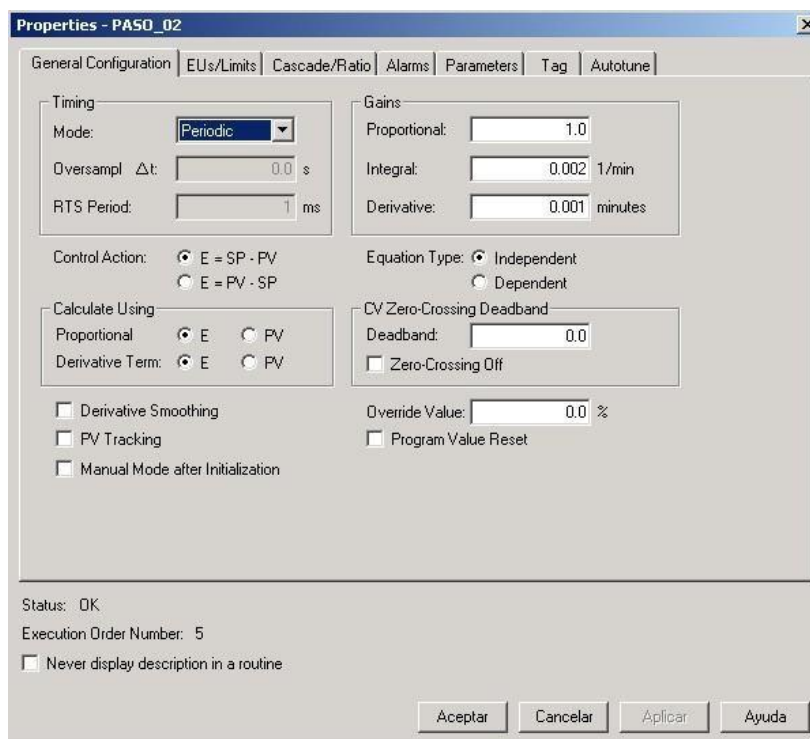


Figura 25.1 Configuración de la ecuación PID

## Restablecimiento Anti-windup y transferencia sin perturbaciones de manual a automático

La instrucción PID automáticamente produce un restablecimiento Anti-windup para prevenir la saturación del término integral cada vez que la salida CV alcanza los valores

máximo o mínimo, según lo establecido por los parámetros MAXO y MINO. El término integral acumulado permanece estático hasta que la salida cae por debajo del límite máximo del CV o se eleva por encima de su límite mínimo. La acumulación integral normal se reanuda automáticamente.

### **Parámetros de entrada de la instrucción PIDE.**

Los principales parámetros de entrada de la instrucción PIDE se resumen en la tabla 2.2

**Tabla 2.2 Posiciones de los módulos instalados**

<b>SP</b>	Valor del Setpoint
<b>SO</b>	Porcentaje de salida
<b>KP</b>	Ganancia Proporcional. Para ganancias independientes, está es la ganancia proporcional. Para ganancias dependientes, está es la
<b>KI</b>	gaGanannancciaa dlnetl egrconatl.r.o lador. Para ganancias independientes, está es la ganancia integral (1/seg). Para ganancias dependientes, está es un tiempo de restablecimiento (minutos por repetición)
<b>KD</b>	Tiempo derivativo. Para ganancias independientes, está es la ganancia derivativa (seg). Para ganancias dependientes, está es un tiempo de muestreo en minutos.
<b>PE</b>	Selección de ganancias dependientes o independientes. Seleccionar Independientes cuando se desea que las tres ganancias (KP, KI, KD) operen independientemente. Seleccionar Dependiente cuando desea que la ganancia del controlador
<b>CA</b>	aAfccecteió n lads e oCtonras trtorle. s E=PganVa-nScPia os E(KP=SP, K-PVI, K D).
<b>MAXO</b>	Límite superior de CV
<b>MINO</b>	Límite inferior de CV

Los parámetros de límites de la variable de proceso y la variable de control se definen en la pestaña de EUs/Limits:

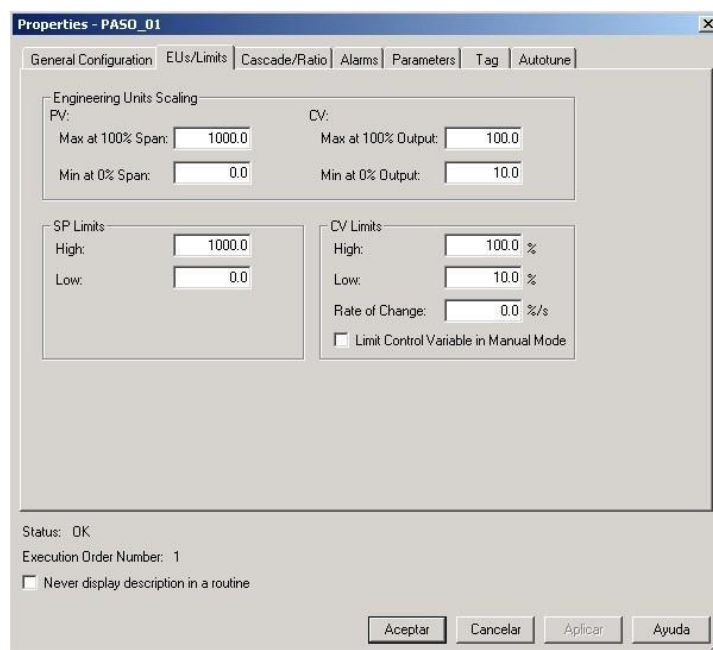


Figura 25.2 Configuración de los parámetros de la instrucción PID  
**Función de Auto-sintonización:**

El RSLogix 5000 PIDE Autotuner proporciona un sencillo auto-sintonizador de lazo abierto incorporado dentro de la instrucción utilizada en el lenguaje de programación por Diagramas de Bloques de Función. Debido a que el PIDE Auto-tuning se construye en el controlador, puede realizar el ajuste automático por medio del PanelView o cualquier otra interfaz de operador, como el RLogix 5000. El bloque PIDE ha sido diseñado para utilizar una etiqueta que estructura de datos se definen el auto-sintonizador. Esto permite a los usuarios crear etiquetas para sintonizar los lazos. Estas etiquetas también se pueden acceder por cualquier dispositivo, como el PanelView, para realizar el auto-tuning mediante el establecimiento y la lectura de los valores apropiados en la estructura de datos de autoajuste en el controlador.

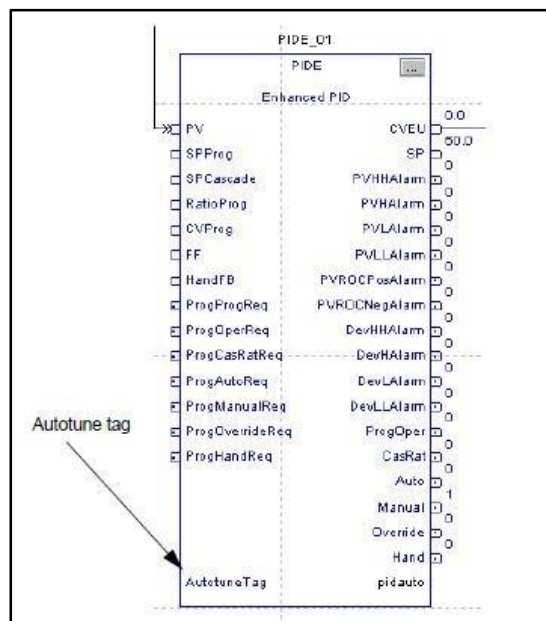


Figura 25.3 Etiqueta del auto-sintonizador

La interfaz de usuario para el auto-sintonizador PIDE consiste principalmente en la pestaña Autotune del cuadro de diálogo Propiedades del PIDE. La función de sintonización automática para un simple lazo abierto, está integrada en la instrucción PIDE.

La pestaña Autotune permite configurar y adquirir la etiqueta PIDE\_AUTOTUNE para el algoritmo de sintonización automática. Los cuadros

asociados son para iniciar el algoritmo de sintonización, monitorear las salidas y cargar las ganancias sintonizadas.

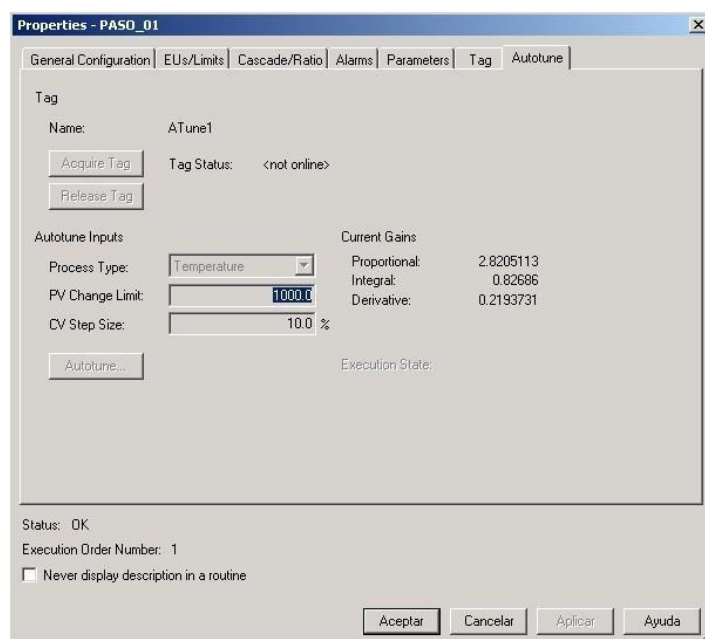


Figura 25.4 Cuadro de diálogo del Autotune PIDE

Los pasos para la sintonización mediante RSLogix 5000 son los siguientes:

- Se selecciona el tipo de proceso (Process Type) que se desea sintonizar, en este caso se eligió un proceso de temperatura.
- Se debe definir el límite de cambio de la variable de proceso, en este caso se establece el límite al 100%.
- Se establece el valor del escalón de entrada del sistema. En nuestro caso un 10% del valor total, es decir, una apertura de la válvula del 10%. Un escalón de mayor porcentaje duraría más tiempo estabilizándose y sobrepasaría los límites de tiempo de la auto-sintonización.
- Luego de configurar el proceso de sintonización se da clic en el botón autotute y muestra la siguiente pantalla.

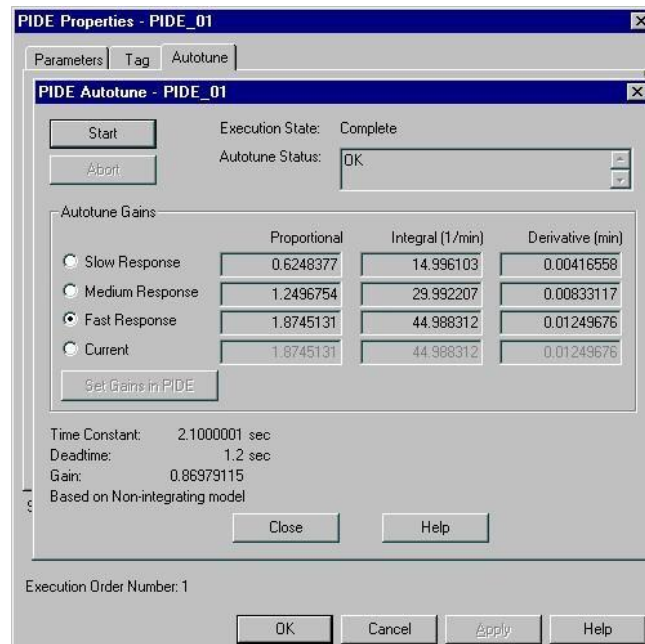


Figura 25.5 Cuadro de resultados de la auto-sintonización

- El cuadro de diálogo PIDE Autotune permite la sintonización del PID y carga las ganancias PIDE adquiridas. Al hacer clic en el botón “Start” y el algoritmo de autoajuste comenzará a de ejecución.
- En cualquier momento durante esta operación se puede cancelar el proceso de sintonización automática haciendo clic en el “Abort”.
- Si el algoritmo de autoajuste falla, el motivo de la falla se muestra en la caja de estado de autoajuste.
- También puede seleccionar que tipo de ganancias quiere utilizar para generar una respuesta lenta, media o rápida.
- Puede actualizar manualmente cualquiera de las ganancias mediante la selección actual y escribiendo nuevos valores en las cajas.
- Cuando el algoritmo de sintonización automática se ha completado correctamente, puede cargar estas ganancias al controlador PID dando clic en el botón “Set Gains in PIDE”.



## **Capítulo 5 Resultados**

### **5.1. Resultados Experimentales**

Los sistemas de control PID diseñados fueron verificados mediante experimentación. Se llevaron a cabo 3 tipos de experimentos:

- Control PIDE en cascada entre variable de PRESION Y FLUJO
- Control PIDE en cascada entre variable de PRESION Y NIVEL
- Control PIDE en cascada entre variable de FLUJO Y NIVEL

Las especificaciones de diseño a cumplir en todos los casos son:

- Lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
- Diseñar el lazo secundario de manera que contenga las perturbaciones más serias.
- Respuesta de regulación del sistema más estable y más rápido.

#### **5.1.1. Control Proporcional Integral Derivativo Avanzado (PIDE)**

Para lograr un control PIDE en cascada se necesita ajustar los parámetros según el tipo de proceso que se requiera, el límite de la variable de proceso (PV) y el porcentaje con el que queremos que variable controlada (CV) realice el autotuneo.

Luego de proceder con el autotuneo con el que podemos lograr una respuesta rápida, respuesta media y respuesta lenta.

En la siguiente figura se puede apreciar los parámetros que se configuran para proceder con el autotuneo del bloque PIDE.

**Properties - LAZO\_PRIMARIO\_PRECION**

General Configuration | EUs/Limits | Cascade/Ratio | Alarms | Parameters | Tag | **Autotune**

**Tag**

Name: AUTOTUNNING

Acquire Tag | Release Tag

Tag Status: <not online>

**Autotune Inputs**

Process Type: Temperature

PV Change Limit: 0.0

CV Step Size: 0.0 %

Autotune...

**Current Gains**

Proportional: 0.5

Integral: 1.05

Derivative: 0.0001

Execution State:

Status: OK

Execution Order Number: 2

☐ Never display description in a routine

Aceptar | Cancelar | Aplicar | Ayuda

Figura 26.1 Parámetros que se configuran para el autotuneo del bloque PIDE

En la siguiente figura se puede apreciar los resultados obtenidos al realizar el autotuneo tales como los valores PID en las 3 respuestas antes mencionadas; respuesta lenta, media y rápida.

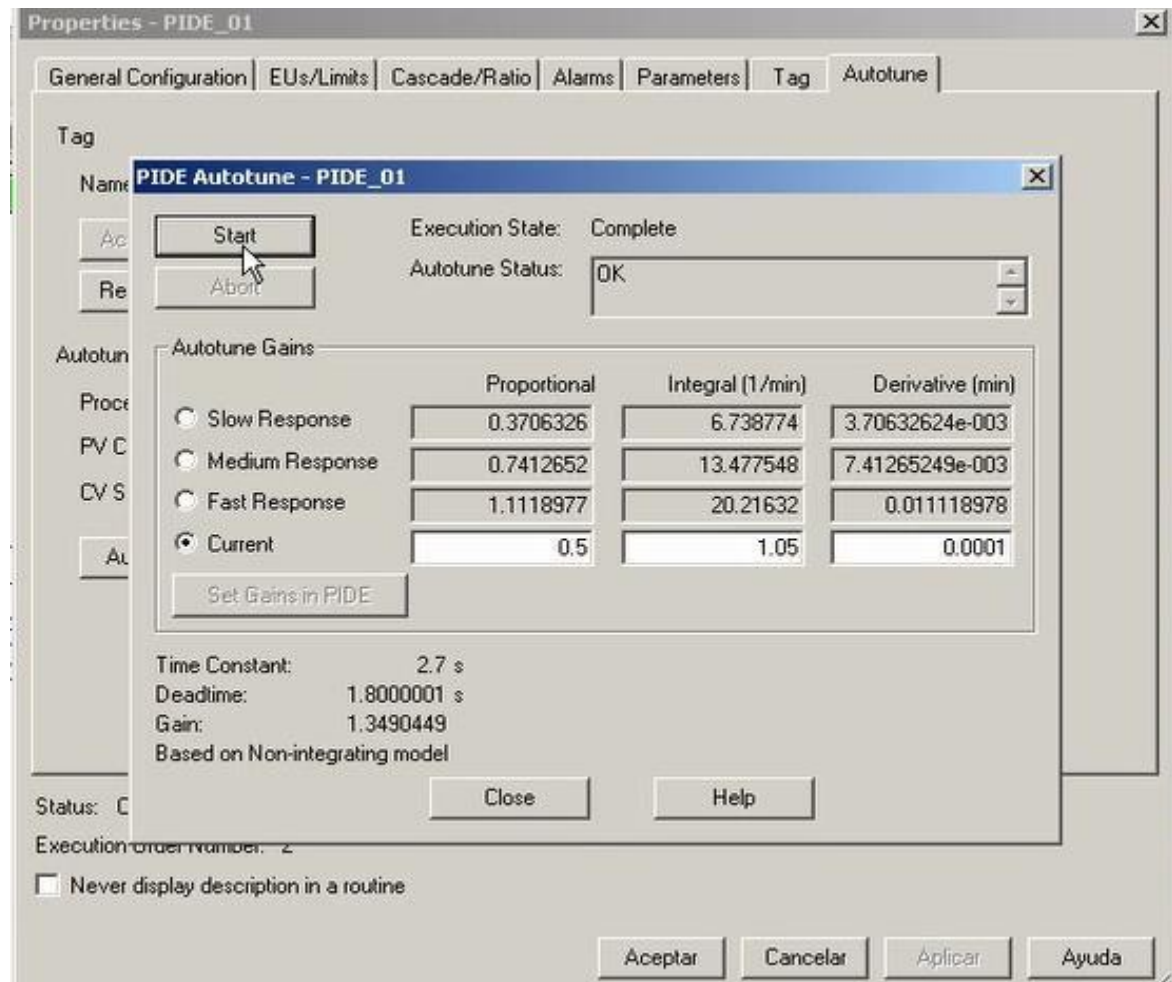


Figura 26.2 Resultados del autotuneo en las 3 respuestas: lenta, media y rápida.

## Experimentación con el control en cascada entre PRESION Y FLUJO

En la siguiente figura se puede apreciar la conexión en cascada entre los bloques PIDE de PRESION Y FLUJO, donde la variable controlada se conecta con el SP cascade.

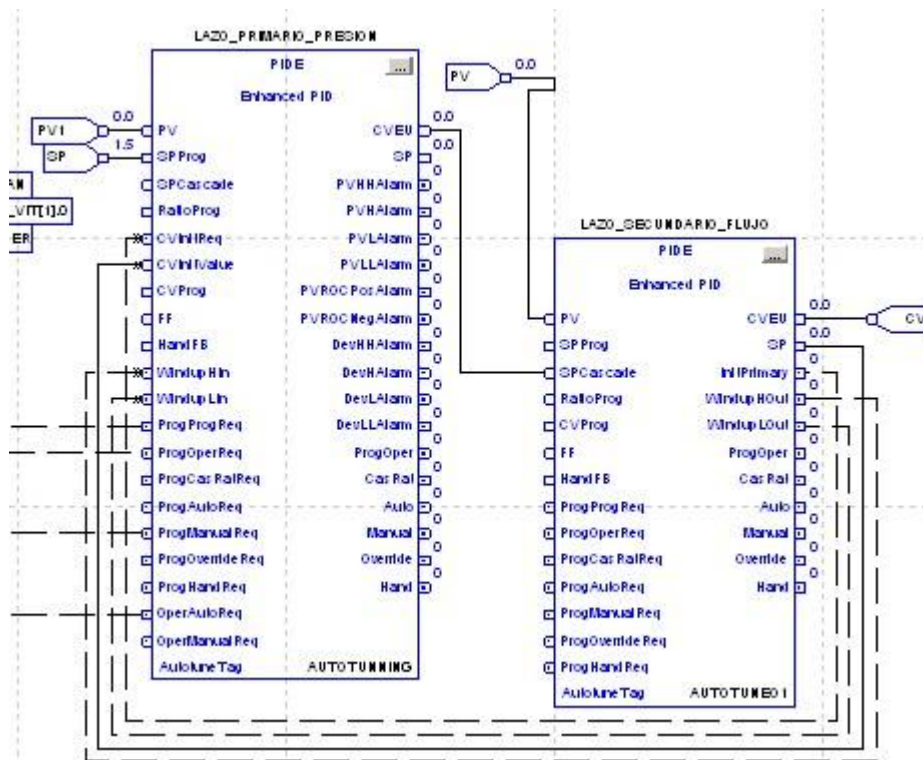


Figura 27.1 Conexión en cascada entre los bloques PIDE de PRESION Y FLUJO  
**Parámetros obtenidos del autotuneo.**

En la siguiente figura se pueden ver los parámetros obtenidos mediante el autotuneo, para nuestro caso utilizaremos la respuesta media.

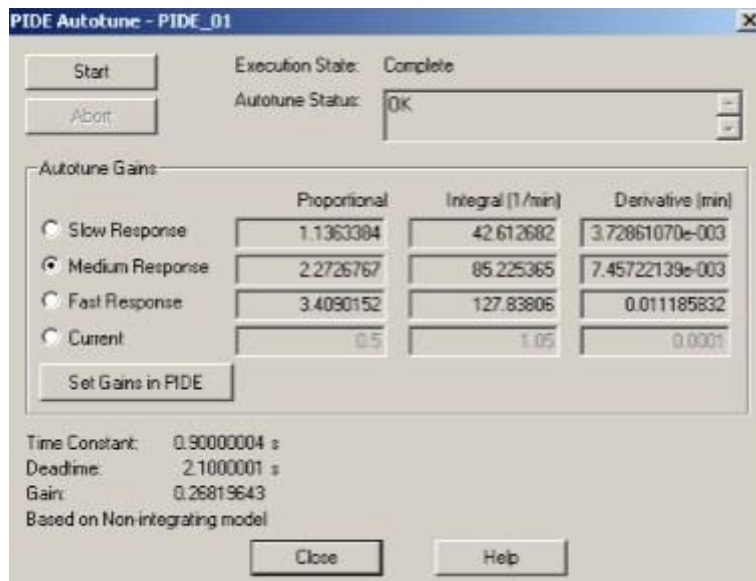


Figura 28.1 parámetros obtenidos mediante el autotuneo

### Respuesta en tiempo real en SCADA.

En la siguiente figura se muestra la una gráfica en tiempo real del comportamiento de las dos variables PRESIÓN Y FLUJO con un SP establecido. Se logra visualizar que no se estabiliza.

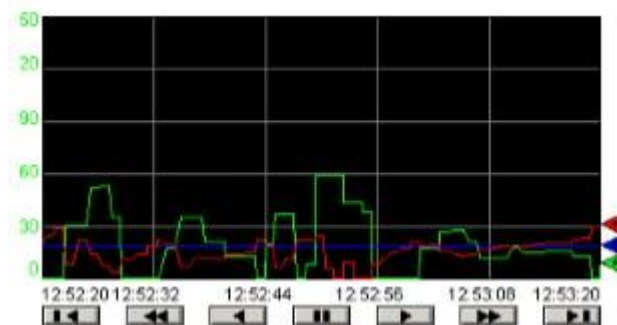


Figura 29.1 Gráfica en tiempo real de PRESIÓN Y FLUJO con un SP establecido.

### Experimentación con el control en cascada entre PRESION Y NIVEL

En la siguiente figura se puede apreciar la conexión en cascada entre los bloques PIDE de PRESION Y NIVEL, donde la variable controlada se conecta con el SP cascade.

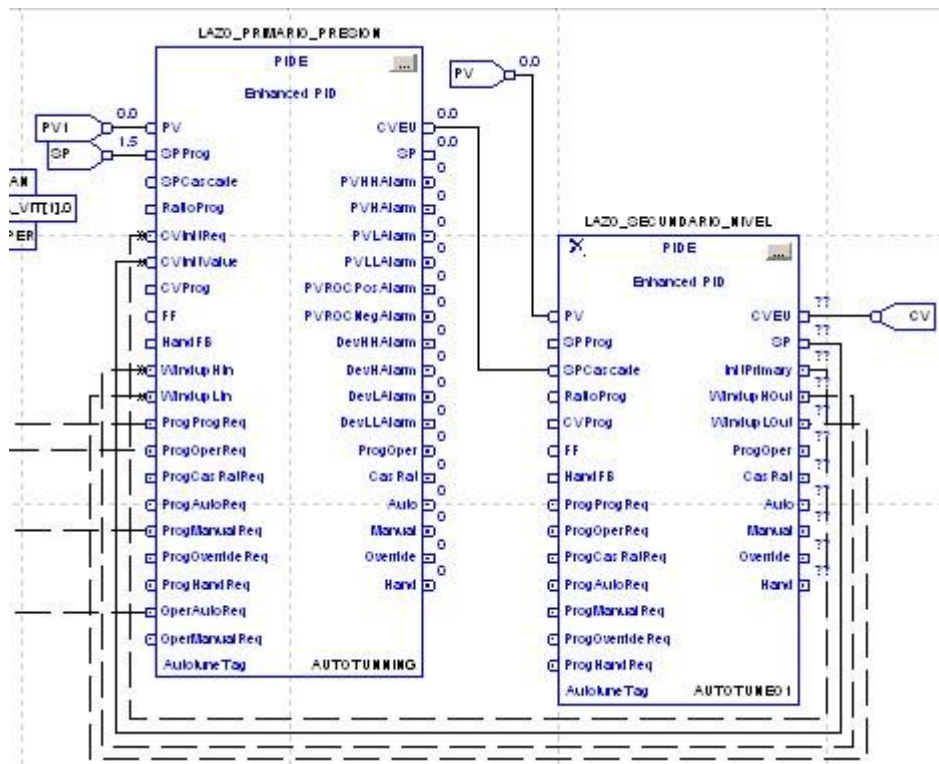


Figura 30.1 Conexión en cascada entre los bloques PIDE de PRESION Y NIVEL

### Parámetros obtenidos del autotuneo

En la siguiente figura se pueden ver los parámetros obtenidos mediante el autotuneo, para nuestro caso utilizaremos la respuesta media

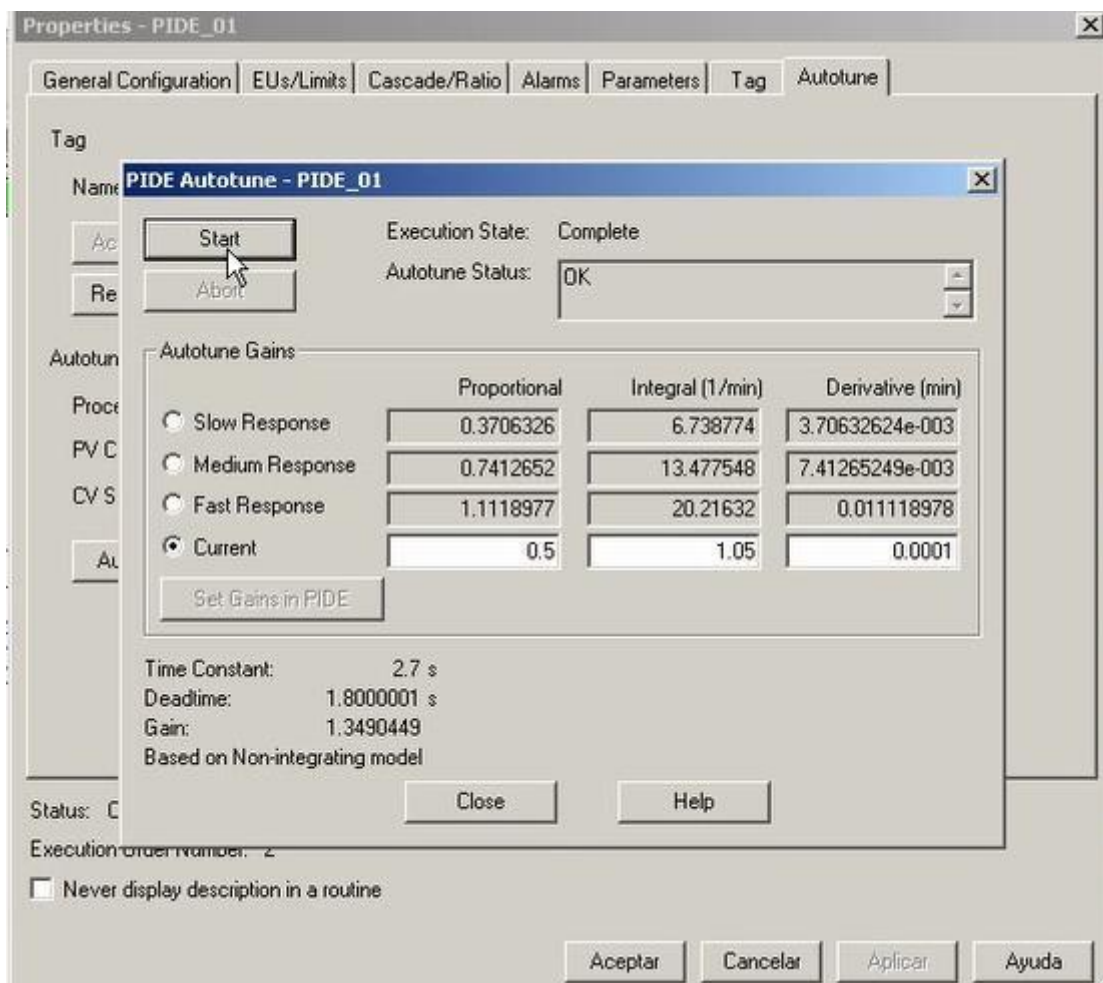


Figura 30.2 parámetros obtenidos mediante el autotuneo

## Respuesta en tiempo real en SCADA.

En la siguiente figura se muestra la una gráfica en tiempo real del comportamiento de las dos variables PRESIÓN Y NIVEL con un SP establecido. Se logra visualizar que no se estabiliza.



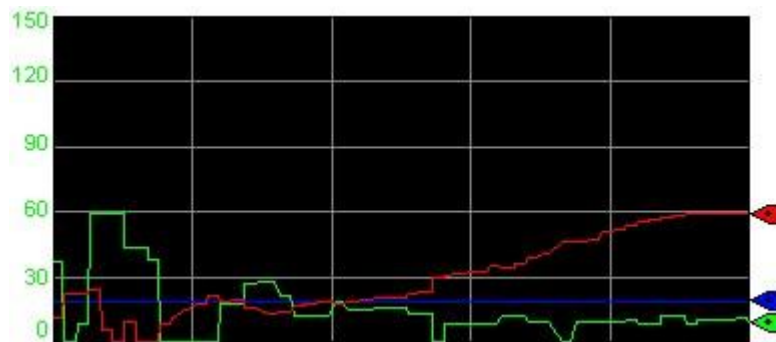


Figura 30.3 gráfica en tiempo real de PRESIÓN Y NIVEL con un SP establecido

### Experimentación con el control en cascada entre NIVEL Y FLUJO

En la siguiente figura se puede apreciar la conexión en cascada entre los bloques PIDE de NIVEL Y FLUJO, donde la variable controlada se conecta con el SP cascade

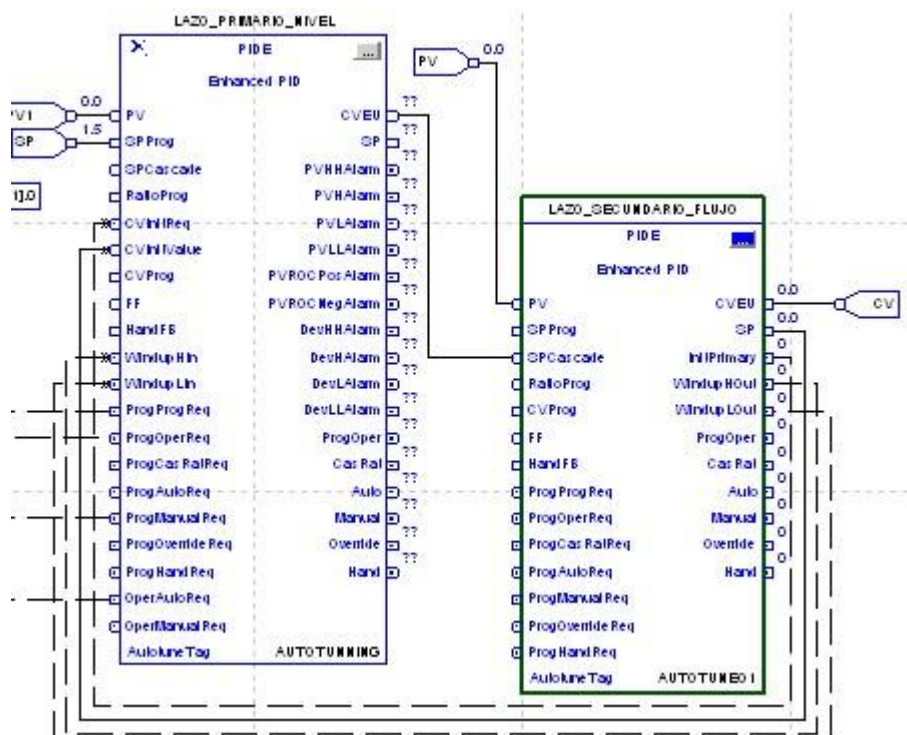


Figura 31.1 Conexión en cascada entre los bloques PIDE de NIVEL Y FLUJO.

### Parámetros obtenidos del autotuneo.

En la siguiente figura se pueden ver los parámetros obtenidos mediante el autotuneo, para nuestro caso utilizaremos la respuesta media.



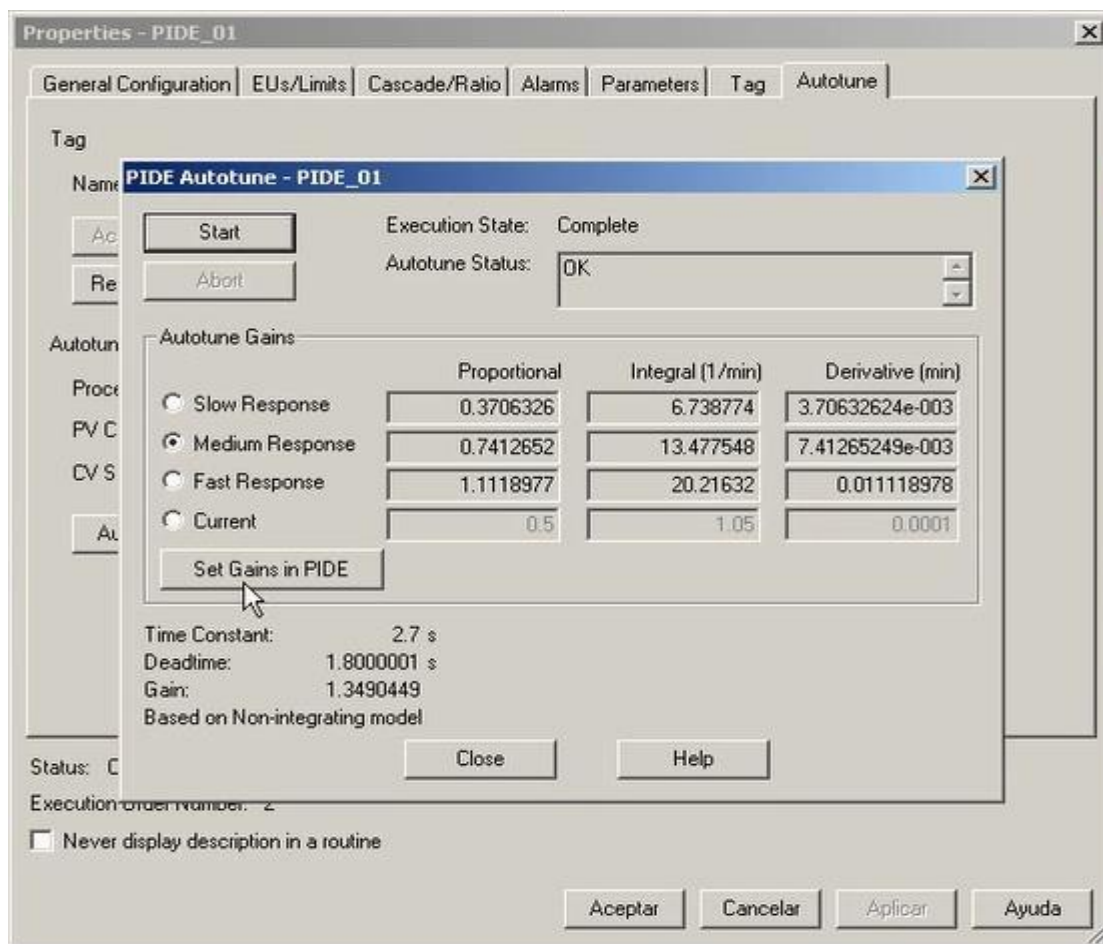


Figura 31.2 Parámetros obtenidos mediante el autotuneo: respuesta media.

## Respuesta en tiempo real en SCADA.

En la siguiente figura se muestra la una gráfica en tiempo real del comportamiento de las dos variables NIVEL Y FLUJO con un SP establecido. Se logra visualizar se logró estabilizar el sistema



Figura 31.3 Gráfica en tiempo real variables NIVEL Y FLUJO con un SP establecido

## CONCLUSIONES

- Se logró Implementar el sistema SCADA para el control y el monitoreo de la planta de NIVEL, PRESIÓN Y FLUJO utilizando software FACTORY TALK VIEW y haciendo uso del panel view 600 para su visualización.
- Se diseñó el control en cascada con dos variables: variable principal (nivel), variable secundaria (flujo) La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso, implementado el Control en Cascada. La variable presión se usó para fines experimentales durante las pruebas de control, en el proceso quedara como una variable indicadora.
- La estabilidad del sistema se logró haciendo uso de las variables NIVEL y FLUJO ya que representaron una rápida respuesta durante las pruebas realizadas ante una perturbación. La variable PRESIÓN se utiliza como un indicador.
- Se diseñó y configuró una red Ethernet/IP para la comunicación entre nuestros equipos: PLC ALLEN BRADLEY L32E, PANEL VIEW 600 Y PC, haciendo uso de un switch para conectar todos los equipos usados durante el proceso cada uno con su respectiva IP.
- Se logró la comunicación de la PC con los PLC mediante RSLinx Classic la cual me permite acceder a la programación y configuración del software RSLogix hasta las aplicaciones HMI (Interfaz operador – máquina) mediante el software FACTORY TALK VIEW.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda para efectos de mayor precisión en la lectura del nivel del tanque de agua, adquirir un sensor de nivel industrial ya que en el proyecto se está usando un sensor ultrasónico controlado por arduino y la señal de lectura que este envía al PLC, tiene una Interferencia de ruido eléctrico producido por la planta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alulema, J. (2006). *Control de Procesos*. Ecuador.  
Disponble en <https://es.scribd.com/document/354299148/Sintonia>

Arias, Y. y Piracoca, M. (2015). *Diseño a implementación de un sistema scada para el control de nivel y temperatura del tanque de agua caliente de la planta de procesos análogos (PPA)*. Universidad Francisco José de Caldas. Bogotá. Colombia.

Bailey D. & Wright E. (2003). *Practical SCADA for Industry*. IDC Technologies.

Bolton, W. (2001). *Ingeniería de control*. Ediamac. 2da. Edición. México.

Brito, H. (2012). *Control*. Maturín, Venezuela. En [https://es.slideshare.net/hector\\_277/teoria-de-control-13945972](https://es.slideshare.net/hector_277/teoria-de-control-13945972)

Castillo, P. (2008). *Estabilidad*. Instituto de la Universidad de Concepción.

Chiavenato, I. (2000). *Introducción a la Teoría General de la Administración*, 5° Edición, México, D. F.

Dorf, R. (2005). *Sistemas de control moderno*. Décima edición. Madrid: Pearson Educación.

Fidalgo, J., Fernández, M. y Fernández, N. (2016). *Tecnología Industrial II*. Editorial Paraninfo S.A. Madrid, España.

Figueira, (2016). *Estrategia de control en cascada para un lazo de temperatura del secador de bioproductos del CIGB de Camaguey*". Disponible en <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/6360/Julio%20Cesar%20Filgueira%20Pons.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gómez, J., Reyes, R. & Guzmán del Río, D. (2008). *Temas especiales de instrumentación y control*. Cuba: Editorial Félix Varela.

Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Séptima edición. México D.F.: Pearson Educación.

Leal, G. (2014). *Modelos matemáticos en sistemas de control*. Universidad Alonso de Ojeda.

López, W. (2012). *Teoría del Control. Tipos de controladores*. Maturín, Venezuela. En <https://es.slideshare.net/lalastuy/teoria-4>

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Cuarta edición. Editorial Pearson Prentice Hall. Madrid. España.

Pérez, E. (2014). *Los sistemas scada en la automatización industrial*. Tecnología en marcha. Vol. 28 – Nro.4. Costa Rica. Artículo disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5280242.pdf>

Pérez, J. (2009). *Apuntes de la materia de Teoría de Control*. Electrónica Industrial.

Rodríguez, A. (2007). *SISTEMAS SCADA*. 2da. Edición. Editorial MARCOMBO S.A. México.

Shaw, W. (2006). *Ciberseguridad para sistemas SCADA*. Oklahoma: PennWell Corporation

Zambrano, J. (2013). *Automatización Industrial: Control en cascada*. Disponible en <https://prezi.com/5i5kfq3igs4z/tema-control-en-cascada/>

